



Simulering av kombinerade rundvirkestransporter och kartläggning av dess effekter på servicedimensioner

*Simulation of combined transports and mapping of the effects on
service dimensions*

Oskar Gustavsson

**Arbetsrapport 13 2015
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Dag Fjeld**

Simulering av kombinerade rundvirkestransporter och kartläggning av dess effekter på servicedimensioner

*Simulation of combined transports and mapping of the effects on
service dimensions*

Oskar Gustavsson

Nyckelord: händelsestyrd simulering, kombinerade transporter, leveransprecision, ledtid, lager, virkesförsörjning, massaved

Arbetsrapport 13 2015

Examensarbete i skogshushållning vid Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, 30 hp
EX0772, A2E

Jägmästarprogrammet

Handledare: Dag Fjeld, SLU, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Examinator: Dan Bergström, SLU, Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Sveriges lantbruksuniversitet

Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2015

Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi

Förord

Denna studie är ett examensarbete i skogshushållning motsvarande 30 hp vid institutionen för skogens biomaterial och teknologi vid Sveriges lantbruksuniversitet i Umeå.

Jag vill tacka Henrik Sakari, Ingemar Ljunggren och Daniel Yring på SCA Skog, Tomas Frick och Emil Bengtsson på Södra Skog samt Kjell Gustavsson på Sveaskog för att ha bidragit med mycket värdefullt material och många goda synpunkter. Detta arbete hade inte varit möjligt utan er!

Dessutom vill jag rikta ett tack till alla mina kursare som har bidragit med synpunkter, genomläsning och motivation genom hela arbetet.

Mitt sista och största tack ger jag till min handledare, Dag Fjeld, som gav mig chansen att delta i det här projektet och som har coachat mig genom arbetet som om han vore en NHL-coach.

Sammanfattning

Genom den rådande utvecklingen inom svensk rundvirkeförsörjning, som går mot större och färre produktionsanläggningar, blir medeltransportavståndet allt längre. Detta ökar behovet av järnvägstransporter av virke och förändrar därmed de andelar som bil- och järnvägstransporter utgör av den totala virkeförsörjningen. Ytterligare påverkan på transportval åstadkoms av varierande järnvägsnät och industriplacering i förhållande till detta.

Syftet med denna studie var att utveckla en simuleringsmodell för att kartlägga effekterna av systemkonfiguration och omvärldsfaktorer på leveransprecision, lagernivåer och ledtider i massavedsförsörjning.

Metoden som användes var objektorienterad händelsestyrd simulering i kombination med linjärprogrammering. Styrningslogiken som användes baserades på systemstatus och tog beslut om allokering av transportresurser genom justerad schemaläggning av tåg, anpassningar i biltransporternas totala kapacitet samt omstyrning av flöden mellan industrier. Två system användes, baserade på järnvägens struktur för norra respektive södra Sverige. Varje system utsattes för sex olika scenarier varav tre scenarier med ökad andel järnvägstransporter. Scenarierna baserades på störningar i efterfrågan respektive tillgång. För att kartlägga effekterna jämfördes leveransprecision, lagernivåer och ledtider mellan scenarierna.

Att modellera en realistisk leveransprecision har varit den huvudsakliga utmaningen då detta är komplext och tidskrävande. Den huvudsakliga utmaningen har varit att återskapa en realistisk respons som möjliggör hög månatlig leveransprecision. För grundfallet (utan störningar) låg lagernivåer och ledtider inom typiska intervall. Ledtiderna för bil- och järnvägstransporter var länkade till nivåerna på väglager respektive terminallager. Den generella effekten av ökade järnvägstransporter var en ökad förmåga att parera störningar i efterfrågan. Den mest framträdande skillnaden mellan systemen var att systemet som representerar södra Sverige gav större förmåga att hålla leveransprecisionen inom det önskade intervallet.

Den viktigaste slutsatsen med denna studie är att kombinationen av objektorienterad händelsestyrd simulering och linjärprogrammering är en lämplig metod för att undersöka hur olika störningar påverkar virkeförsörjning.

Nyckelord: händelsestyrd simulering, kombinerade transporter, leveransprecision, ledtid, lager, virkeförsörjning, massaved

Summary

With structural development towards fewer and larger mills, growing supply areas require an adjustment in the combination of rail transport that wood supply consists of. Additional effects on choice of transport method originate in varied railway network and mill placement.

The aim of this study was to develop a simulation model for mapping the effect of rail system configuration and external events on delivery precision, stock levels and lead times in pulpwood supply.

The modeling was done with object oriented discrete-event simulation in combination with linear programming. System responses are triggered by system status and include adjusting train schedules, adjusting truck capacity and rerouting wood flow between mills. Two configurations were modeled based on rail systems from north and south Sweden, respectively. Each system was subjected to six scenarios whereof three scenarios simulated an increase in railway transport proportion. These scenarios were based on disturbances in supply and demand. To map the effects of the scenarios delivery precision, stock levels and lead times were compared between them.

The main challenge has been to reproduce a realistic response enabling high delivery precision at a monthly level as this is complex and time-consuming. For the base case scenario (no system disturbances) simulated stock levels and lead times were found to be within typical intervals. Lead times for truck and rail deliveries were linked directly to road-side and terminal stock levels, respectively. The general effect of an increase in volume transported by rail was an increased ability to counter disturbances in demand. This effect was also found between the systems, where the system representing the south of Sweden had a greater ability to counter demand disturbances.

The most important conclusion of this study is that a combination of object oriented discrete event simulation and linear programming is a suitable method for examining how different disturbances affect wood supply.

Keywords: discrete event simulation, multimodal transport, delivery precision, lead times, stock, wood supply, pulpwood

Innehållsförteckning

Förord.....	2
Sammanfattning	3
Summary	4
Innehållsförteckning.....	5
1 Inledning.....	7
1.1 Utveckling av transportarbete	7
1.2 Utveckling av planering för minskade transportkostnader.....	7
1.3 Utveckling av servicedimensioner inom virkesförsörjning.....	9
1.4 Syfte.....	10
1.4.1 Hypoteser	11
2 Material och metod.....	11
2.1 Simulering	11
2.2 Val av studieområde och system	12
2.4 Scenarier.....	15
2.3 Produktions- och transportplanering för skapande av simuleringsinställningar	15
2.5 Styrningslogik	18
2.6 Validering.....	20
2.7 Kartläggning av servicenyckeltal	20
3 Resultat.....	22
3.1 Grundscenariot, säsongsmönster och fördelning.....	22
3.1.2 Nyckeltalens fördelning	26
3.2 Jämförelse av nyckeltal för servicedimensioner mellan scenarier	27
3.2.1 Leveransprecision.....	27
3.2.2 Lagernivå.....	27
3.2.3 Ledtider	27
3.3 Samband mellan nyckeltal för servicedimensioner.....	31
4 Diskussion	37
4.1 Diskussion av resultatet.....	37
4.1.1 Grundfallet	37
4.1.2 Jämförelse av scenariernas resultat	37
4.1.3 Simuleringar med ökad tågandel.....	37
4.1.4 Nyckeltalens samband.....	38
4.2 Utvärdering av material.....	39
4.2.1 Produktionsplan.....	39
4.2.2 Val av scenarier	39
4.3 Utvärdering av metodval	39
4.3.1 Simuleringsmetodiken.....	39

4.4 Utvärdering av styrningslogik	41
4.5 Jämförelse med andra studier	42
4.6 Vidare forskning och slutsatser	42
4.6.1 Slutsatser	42
Referenser.....	44
Personlig kommunikation	47
Bilagor	48
Bilaga 1 – Schematisk bild av simuleringsmodellen.....	48
Bilaga 2 – Schematisk bild av modellen för skapande av inställningar till simuleringsmodellen	49

1 Inledning

1.1 Utveckling av transportarbete

Trenden för produktionen av pappersmassa och sågade trävaror har under en längre tid varit mot färre produktionsenheter med allt större kapacitet. Detta har bland annat medfört att industriernas fångstområden kraftigt ökat. Större fångstområden medför längre transportavstånd och ökad konkurrens mellan aktörer. Den ökade konkurrensen har i sin tur drivit på företagen ytterligare i sin jakt på minskade kostnader, framförallt inom transport (Fohlin & Silver 1997). Dessutom har kostnaderna för biltransport ökat på grund av förändrade arbetsvillkor och kraftigt ökande drivmedelskostnader (Löfroth & Svenson 2010).

Medeltransportkostnaden för biltransporter av rundvirke är idag cirka 0,63 kr/tkm (Andersson & Frisk 2013). Att beskriva skillnaden mellan kostnaden för biltransporter och tågtransporter är inte helt enkelt. Detta bland annat då de fasta kostnaderna ser olika ut för de olika systemen samt att de volymer som transporteras med tåg även kortare sträcka transporteras med bil till terminal (Fjeld & Dahlin 2012). Dock kan det sägas att de fasta kostnaderna för järnvägstransport är högre än för biltransport. Det omvända gäller för de rörliga kostnaderna (Lumsden 1998; Bark 2005). En kraftigare ökning i kostnaderna har skett under de senaste decennierna för biltransport haft en kraftigare ökning än för järnvägstransport (Löfroth & Svenson 2010). Sammantaget gör detta att kostnaden för tågtransporter generellt är lägre när det gäller långa transportavstånd och därmed blir en ökad användning av tågtransporter en åtgärd som kraftigt kan sänka den totala transportkostnaden (Saranen & Hilmola 2007; Hilmola 2008). Dock kan tågtransport höja den totala transportkostnaden men kan i utbyte ge en högre flexibilitet (Korpinen 2013).

1.2 Utveckling av planering för minskade transportkostnader

Planering är ett område där det har skett intensiv forskning för att minska transportkostnaderna (Tabell 1). Detta då det finns stora möjligheter till besparing i en effektivare planering. Nedan redovisas denna forskning uppdelad efter olika ämnen och områden.

På strategisk nivå har forskningen handlat om att undersöka hur olika parametrar påverkar den optimala råvarusammansättningen (Lukka 1994; Dogan m.fl. 1997; Puodziunas & Fjeld 2008). Övrig forskning har på strategisk nivå ofta handlat om att avgöra vilket transportsätt som är lämpligast i olika situationer (Hell 2011; Korpinen 2013; Eriksson m.fl. 2014).

Flest studier har utförts med flödesplanering som fokus, kanske för att det här finns en stor besparingspotential. Forskningen handlar till stor del om att utreda besparingspotentialen vid användning av optimal destinerings och att utveckla system för detta (Forsberg 2002; Bergdahl m.fl. 2003; Forsberg m.fl. 2005). Även potentialen av att samlasta olika sortiment har undersökts (Zilo 2013). I övrigt har forskningen varit inriktad på anpassning av befintliga system till nya logistiksituationer (Widinghoff 2014) och hur ruttplaneringen kan lösas (Andersson m.fl. 2008). Vilka potentiella besparingar som finns i att schemalägga transporter har även det analyserats i viss omfattning (Weintraub m.fl. 1996; El Hachemi m.fl. 2011).

Ytterligare studier inkluderar analyser av hur ökat samarbete mellan olika aktörer påverkar utförandet (Carlsson & Rönnqvist 2005; Alayet m.fl. 2013) och analyser av hur förändrade kösystem eller schemaläggningssystem påverkar effektiviteten vid råvarumottagning (Iannoni & Morabito 2006; Beaudoin m.fl. 2012; Marques m.fl. 2012; Wahlström Bergstedt & Kollberg 2014).

I arbetet med att effektivisera planeringen har huvudsakligen två metoder använts, simulering och linjärprogrammering. Dessa två metoder fyller olika syften, även om de i vissa fall kan överlappar varandra. Huvudsakligen har linjärprogrammering använts för att optimera befintliga system eller konstruera nya system. Simulering har istället använts för att analysera hur system är konstruerade eller hur olika delar samverkar (Arnäs 2003).

Tabell 1. Litteratur som behandlar planeringsproblem i rundvirkesförsörjning uppdelad efter område
Table 1. Literature dealing with planning problems in roundwood supply divided by theme

Område	Författare	Tema
Råvaru-sammansättning	Dogan m.fl. 1997	Simulering av olika råvarusammansättningar för att effektivisera produktion
	Lukka 1994	Optimering av råvaruansaffning
	Puodziunas & Fjeld 2008	Simulering av hur källornas sammansättning påverkar sorteringskostnader
Transportsätt	Eriksson m.fl. 2014	Val av optimalt transportsätt genom simulering
	Hell 2011	Geografisk prioritering av CTI-fordon
	Korpinen m.fl. 2013	Optimering av energivedstransporter
Flödesplanering	Andersson m.fl. 2008	Optimering av virkesdestinering och ruttplanering
	Bergdahl m.fl. 2003	Optimering av virkesdestinering för biltransporter
	Forsberg 2002	Analys av effektiviseringspotential i planering av transporter
	Forsberg m.fl. 2005	Optimering av virkesdestinering
	Widinghoff 2014	Flödesoptimering för att utreda en ny logistiksituation
Schemaläggning	Zilo 2013	Optimering av fångstområden för industrier för att minimera ledtid
	El Hachemi m.fl. 2011	Minimering av transportkostnader genom schemaläggning
	Weintraub m.fl. 1996	Schemaläggning av biltransporter genom simulering
Supply Chain Management	Alayet m.fl. 2013	Optimering av en hel försörjningskedja
	Carlsson Rönnqvist 2005	Utredning av potentiella vinster genom ökad kundanpassning
Råvarumottagning	Beaudoin m.fl. 2012	Simulering för att effektivisera truckhantering av virke på vedgård
	Iannoni & Morabito 2006	Analys av råvarumottagning och utredning av bästa arbetssätt
	Marques m.fl. 2012	Simulering för att effektivisera truckhantering av virke på vedgård
	Wahlström Bergstedt & Kollberg 2014	Simulering för att effektivisera truckhantering av virke på vedgård

1.3 Utveckling av servicedimensioner inom virkesförsörjning

Kundservice, eller kundservicedimensioner, definieras som alla aktiviteter en aktör utför som ger mervärde för dennes kund. Hädanefter kommer begreppen service och servicedimensioner användas. Inom logistik nämns ofta höjd service som en konkurrensfördel (Mattsson 2002). Service är självklart en fördel även i virkesförsörjning men på grund av den rådande utvecklingen kvarstår ett behov av att hålla låga kostnader. Detta medför att enbart service inte är tillräckligt utan det är en kombination av låga kostnader och service över en viss nivå som eftersträvas. På grund av detta är mängden forskning inom detta område betydligt mindre än inom planering (Tabell 2). Nedan följer de mest centrala delarna av denna forskning med början i mål för ökad service, vidare till arbetssätt för att uppnå dessa och avslutningsvis de fall där analyser av resultatet har genomförts.

Tabell 2. Litteratur som behandlar servicedimensioner inom rundvirkesförsörjning

Table 2. Literature dealing with customer service in roundwood supply

Författare	Tema
Bäckström & Åström 2002	Erfarenheter av arbete med ökad kundservice
Andrén & Fjeld 2004	Utredning av vilka mål olika aktörer i rundvirkesförsörjning har
Hedlinger m.fl. 2005	Utredning av potentialen att ha olika nivåer av kundservice
Uusitalo 2005	Beskriver läget och utvecklingen som kan förväntas för kundservice

Att ökad service i virkesförsörjning kan minska det bundna kapitalet i försörjningskedjan och även minska transportkostnaden framgår enligt Åström & Bäckström (2003). Andrén & Fjeld (2004) undersöker hur graden av kundanpassning påverkar vilka mål aktörer i en försörjningskedja för massaved har. Utifrån detta formulerades en generell matris över vilka nyckeltal som används i planeringen och uppföljningen av arbetet samt hur detta påverkar vilken information som behöver utbytas mellan de olika parterna i en sådan typ av försörjningskedjor. Utifrån detta så formulerar de en rad målnivåer (Tabell 3) av kundanpassning. De fann också att aktörer med en hög andel internt försörjningsansvar generellt har en högre grad av kundanpassning än aktörer med externt försörjningsansvar.

Tabell 3. Mål och korresponderande nyckeltal för kundservicedimensioner, efter Andrén & Fjeld (2004). Målen är rangordnade på en glidande skala efter kundanpassning

Table 3. Goals and corresponding performance indicators used to quantify customer service dimensions, from Andrén & Fjeld (2004). The goals are ranked on a sliding scale by customer adaption

Kundanpassning	Mål	Nyckeltal
Hög	Lagerkontroll	Lagerutveckling
	Hög färskhet	Ledtider
	Stabila flöden	Leveransprecision
Låg	Maximal avkastning	Avkastning

Målnivån för kundanpassningen ligger till grund för vilket arbetssätt som krävs för att uppnå den. Hedlinger m.fl. (2005) identifierar vilka beslut och stödprocesser som krävs för att kundservicen ska kunna ökas. Hedlinger m.fl. (2005) beskriver även vilka nyckeltal som är mest centrala att följa upp för att uppnå det eftersträlvade målet. Uusitalo (2005) beskriver

vilka områden inom virkesförsörjning som kan komma att förbättras med avseende på kunddimensioner utifrån den utveckling som råder .

I generell logistik definieras leveransprecision som förmåga att leverera en vara vid rätt tidpunkt och leveranssäkerhet som leverans av rätt sorts vara och kvantitet (Lumsden 1998). Leveransprecision i virkesförsörjning har två olika definitioner, en för interna försörjningskedjor där industrins konsumtion är i fokus och en för externa försörjningskedjor där en beställning är i fokus (Fjeld & Dahlin 2012). Ledtid kan definieras på ett flertal sätt. Ett exempel är tiden från att ett behov uppstår till dess varan är levererad (Lumsden 1998). Vid vilket tillfälle behovet uppstår kan dock vara svårt att bestämma och då brukar tiden från beställning till leverans användas (Mattsson 2002). Med denna definition ingår ofta ett flertal aktörer och en stor del av tiden blir svår att påverka genom effektiva transporter. I arbetet med effektivisering av transporter är inte produktionstiden intressant och då brukar begreppet transportledtid användas. Transportledtid definieras som tiden från att en vara är producerad tills den är levererad till kunden (Roth 2010; Zilo 2013).

Leveransprecision är en parameter som relativt sällan har studerats, men då detta belysts har analyser genomförts av variationen i avvikelse från målet över året och mellan olika leverantörer (Nilsson 2008). I andra fall är det kostnaden av att öka leveransprecisionen som har analyserats (Bergdahl m.fl. 2003). Analyser har även genomförts gällande hur leveransprecision i kombination med ledtid kan användas för att styra virkesförsörjning (Skoog 2000).

När det gäller ledtid är analyser mer sällsynta. Den första gången begreppet introducerades var av Lukka (1994) som delade upp råvaran i klasser utifrån färskhet, där råvaran även kunde nedklassas. I denna studie mättes inga ledtider (Lukka 1994). Carlsson & Rönnqvist (2005) tar även de upp ledtider men de syftar endast till att minska dem utan ansats att beskriva den nivå ledtiderna oftast håller. Enstaka analyser av hur ledtiden påverkar nöjdheten hos privata markägare har också genomförts (Roth 2010). Zilo (2013) beskrev och beräknade ledtider för relativt stora flöden, vilket medförde avsaknad av specifika detaljer. Analyser av ledtid i förhållande till lager visar på att långa ledtider kräver höga lager för att kunna parera de eventuella störningar som kan uppstå i systemet (Haartveit m.fl. 2004).

Analyser av hur lageranvändning påverkar försörjningskedjan har ofta fokuserat på lagrens ekonomiska följder och strävat efter att minimera de olika kostnader som lager är förknippade med (Hägg 1991; Lohmander 1992; Forsberg m.fl. 2000). I ett fåtal fall har även analyser av hur en ökad jämnhet i lagernivåer kan åstadkommas och vilka effekter detta skulle få på kostnaderna genomförts med hjälp av linjärprogrammering. Detta har dock skett i samband med försök att utveckla en interaktiv beslutsmodell i en decentraliserad virkesförsörjningsorganisation (Palander 1998).

Med en ökad användning av tåg för rundvirkestransporter kommer förändringar ske i logistikens utförande med avseende på ankomstfrekvens och leveransmönster. Detta kommer med stor sannolikhet minska transportkostnaderna men vad det får för effekter på servicedimensioner är oklart.

1.4 Syfte

Syftet med denna studie är att simulera hur styrning av kombinerade bil- och tågtransporter påverkar servicedimensioner för rundvirkesförsörjning.

Studiens första delsyfte var att utveckla en simuleringsmodell som utifrån typisk tillgång styr fördelningen av transportsätt för att uppnå hög leveransprecision samt kontroll över lager och ledtid. Det andra delsyftet var att med hjälp av denna modell kartlägga effekter av typiska störningar och ökad tågandel på servicedimensioner vid olika systemkonfigurationer. Arbetet avgränsas till företagsintern försörjning av barmassaved. De systemkonfigurationer som kommer användas är system som motsvarar södra och norra sverige.

1.4.1 Hypoteser

Hypotes 1:

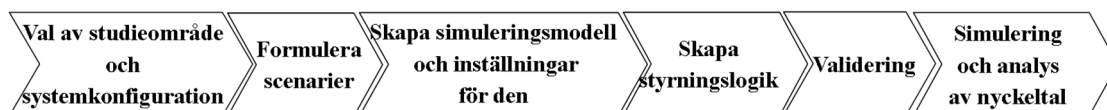
Lager och ledtider hänger rimligen ihop, då ökade lager gör att virke blir liggande längre. Tågtransporter innebär att virke lagras en gång mer än vad det gör vid biltransport. Genom detta bör en ökad tåganvändning öka ledtiderna.

Hypotes 2:

Vid en tjällossning begränsas transporterna från väglager. Därmed begränsas även transporterna till terminallager. Detta kan få som följd att dessa lager ökar i storlek. Följden av detta borde bli att en tjällossning ökar ledtiderna.

2 Material och metod

För att uppfylla de två olika delsyftena delades arbetet upp i sex delar (Figur 1). Först valdes studieområde och systemkonfigurationer representativa för dessa områden skapades. Sedan formulerades scenarier utifrån typiska störningar. Efterföljande del syftade till att skapa en simuleringsmodell och inställningar till den. I steget efter skapades den styrningslogik som sedan användes i själva simuleringsmodellen. Nästa del av arbetet var validering av simuleringsmodellen. Slutligen genomfördes simulering och kartläggning av de valda servicenyckeltalen.



Figur 1. Principskiss över stegen i studiens genomförande.

Figure 1. Outline of the steps in execution of this study.

2.1 Simulering

I denna studie användes metoden objektorienterad händelsestyrd simulering (ODES) för simulering av scenarier för användningen av systemkonfigurationer för järnvägs- och lastbilstransporter. Denna metod användes då den medförde att modellen över transportsystemen enkelt kunde visualiseras för att öka förståelsen av själva systemen.

Fördelarna med ett objektorienterat arbetssätt är att det är modulärt, och därmed kan delar beskrivas både åtskilda och i samverkan. Metoden möjliggör tester av olika scenariers effekt på simuleringen.

En OODES-modell (Figur 2) byggs upp kring att föremål skapas i vissa noder (startblock), lagras och flyttas i andra noder (köblock respektive aktivitetsblock) och sedan konsumeras i

ytterligare noder (utgångsblock). En av de viktigaste beståndsdelarna i modellens dynamik är hur ofta föremål skapas och hur ofta de konsumeras och därmed är inställning av detta central del modellerandet. Förutom detta krävdes inställningar för hur lång transporttiden mellan olika noder skulle vara samt hur lagren skulle vara uppbyggda (vilka föremål som valdes för transport först). Dessutom behövdes en styrningslogik för hur olika kombinationer av systemstatus skulle hanteras. Styrningslogiken var mycket viktig i och med att det var den som gjorde simuleringen realistisk. När dessa inställningar var på plats blev det möjligt att genomföra en validering av simuleringsmodellen med syfte att testa hur realistisk den var. Simuleringarna utfördes i ExtendSim 9.1 och varje simulering, med fem upprepningar tog ca 10 min. I bilaga 1 visas en schematisk bild över modellens utformning.

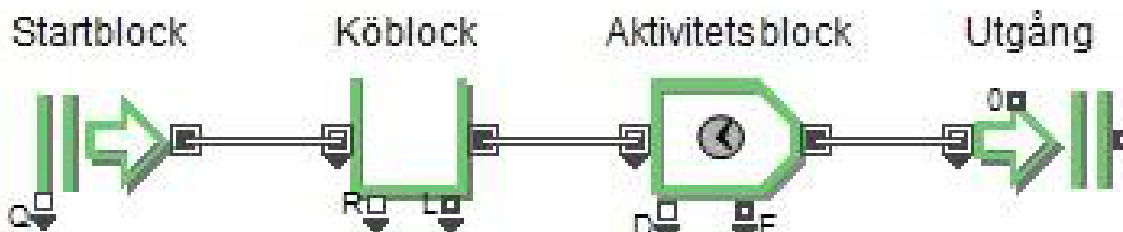


Figure 2. De olika typerna av block som utgör huvuddelen av en OODES-modell

Figure 2. The different types of blocks that make up the main part of an OODES-model

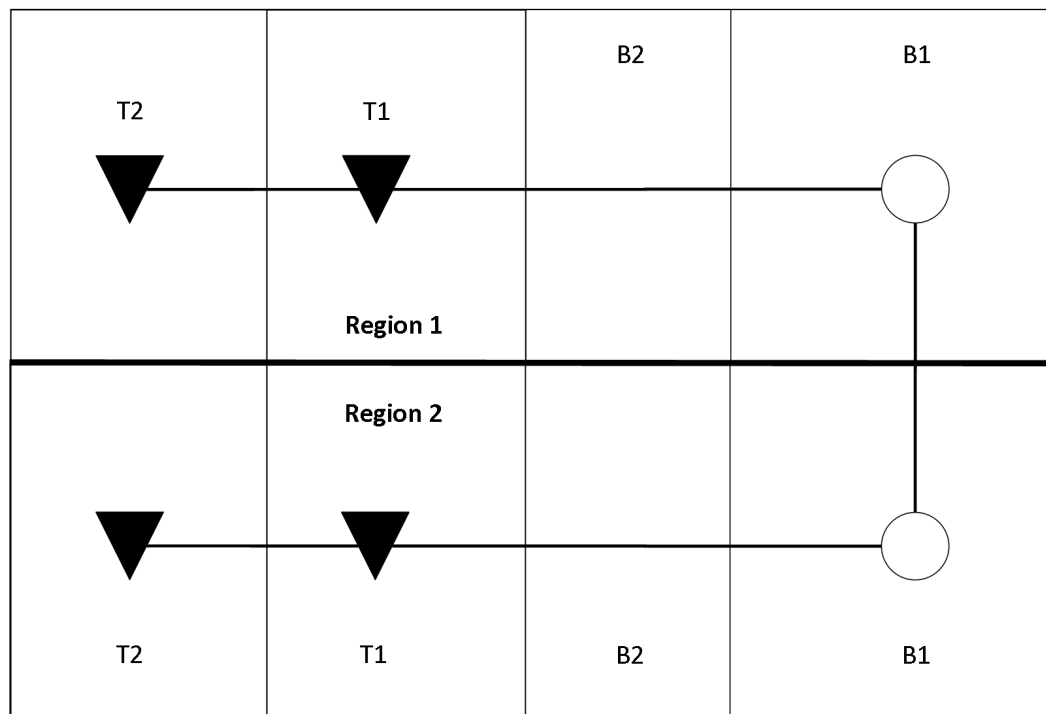
2.2 Val av studieområde och system

I arbetet användes en förenklad version av det verkliga logistiksystemet, liknande det som användes av Saranen & Hilmola (2007). Systemet innehöll två industrier (massabruk), eller konsumtionsnoder, som hade lika stort råvarubehov. Dessa industrier placerades vid kusten. Till dessa industrier fanns det både bil- och järnvägstransporter från ett antal tillgångsnoder (T1, T2, B1 och B2 (Figur 3 och 4)). Tillgångsnoderna placerades inåt landet från industrierna sett. Både konsumtionsnoderna och tillgångsnoderna var förknippade med lagernoder. Detta system användes då det var det minst komplexa systemet som gav möjlighet att parera skillnader i efterfrågan mellan de två industrierna genom att transportera volymer mellan dem. En ytterligare motivering för att ett enkelt system användes var att det ökade möjligheterna att skapa en komplex modell och därmed fånga en bättre bild av verkligheten. Ett enkelt system ansågs dessutom lämpligt då detta, genom att i sig inte vara onödigt komplext, gör en komplex simuleringsmodell överskådligare. Därmed skulle det underlätta processen att åstadkomma en tillräckligt komplex modell för att kunna simulera verkliga processer.

För att beskriva de olikheter som fanns i järnvägsnät, klimat och transportavstånd valdes två områden med olika förutsättningar för kartläggning. De två områden som valdes ut var norra respektive södra Sverige. Den exakta utformningen av systemet baserades på dessa regioners särdrag i industristruktur och järnvägsnät. För norra Sverige skapades ett system med två järnvägsgränar och två terminaler per gren. Dessa grenar försörjde primärt varsin industri som var placerad i änden av järnvägsgrenen. Dessutom skapades möjligheten att styra om virkesflödet mellan de två järnvägsgränarna (Figur 3). Systemkonfigurationen för södra Sverige baserades på en större järnvägsterminal som var gemensam mellan de två industrierna. Förutom denna skapades två terminaler på ändarna av systemet som primärt försörjde varsin industri. Omstyningen av virkesflödet bör därmed huvudsakligen ske från den gemensamma terminalen (Figur 4).

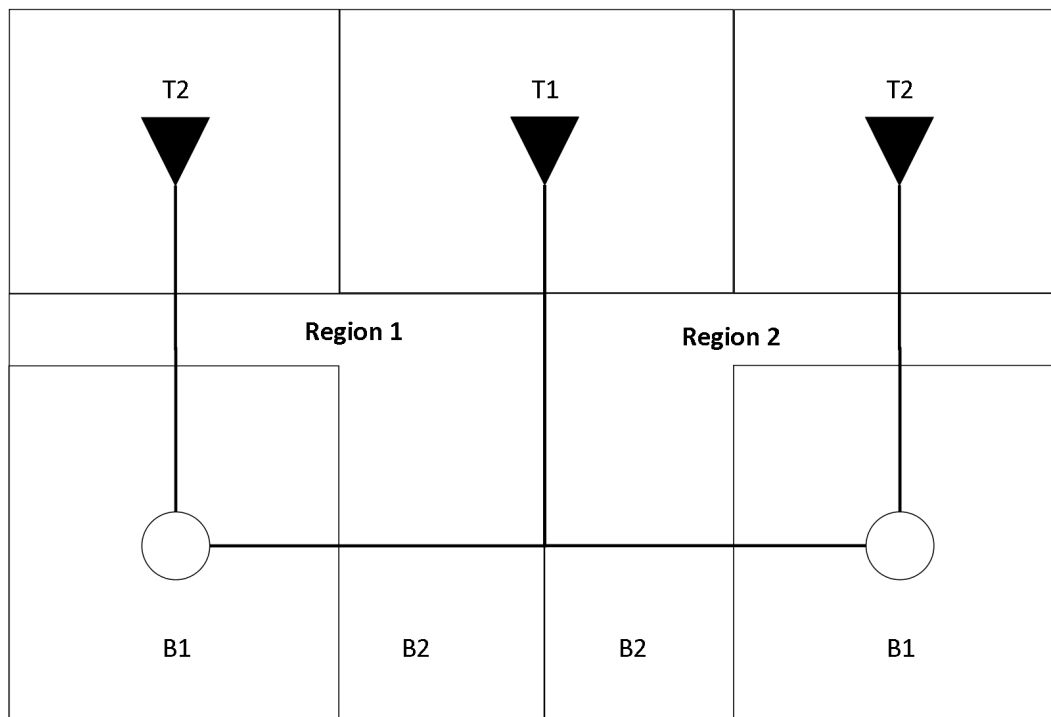
Det material som användes bestod av en sammanställning av SDC-data över flöden till industri och till terminal under år 2012 beställd från Skogforsk. Därmed bestod det av

samtliga svenska aktörers transporter. Den fördelning av flödet till väg- och terminallager som materialet omfattade var inte tillräckligt generell för att användas i simuleringarna. På grund av detta användes endast totala volymer och fördelningen av transportsätt ur materialet. Flödets generella fördelning över året togs fram i samverkan med representanter från näringen för de två regioner för vilka simuleringen skulle ske.



Figur 3. Den systemkonfiguration som användes för norra Sverige. Trianglarna symboliserar järnvägsterminaler och cirkarna industrier. Industrierna är placerade vid kusten och terminalerna inåt landet. T1 och T2 är de områden från vilka virke körs till terminalerna och sedan vidare med tåg till industrierna. B1 och B2 är de områden från vilka virke körs direkt till industrierna med bil.

Figure 3. The supply structure used to represent the north of Sweden in this study. The triangles represent railway terminals and the circles mills. The mills are placed by the coast and the terminals further inland. T1 and T2 are the areas from which the railway terminals are supplied. From the terminals the final transport is done by rail. B1 and B2 are the areas from which transport is done directly by truck



Figur 4. Den systemkonfiguration som användes för södra Sverige. Trianglarna symboliserar järnvägsterminaler och cirkarna industrier. Industrierna är placerade vid kusten och terminalerna inåt landet. T1 och T2 är de områden från vilka virke körs till terminalerna och sedan vidare med tåg till industrierna. B1 och B2 är de områden från vilka virke körs direkt till industrierna med bil.

Figure 4. The supply structure used to represent the south of Sweden in this study. The triangles represent railway terminals and the circles mills. The mills are placed by the coast and the terminals further inland. T1 and T2 are the areas from which the railway terminals are supplied. From the terminals the final transport is done by rail. B1 and B2 are the areas from which transport is done directly by truck

2.4 Scenarier

I samverkan med respondenter ur näringen skapades tre scenarier, ett som var grundfallet och två som var baserade på typiska störningar, för att kartlägga systemets beteende (Tabell 4) (Bengtsson 2014 pers. komm.; Ljunggren 2014 pers. komm.; Gustavsson 2015 pers. komm.; Yring 2015 pers. komm.). Inom dessa scenarier bestämdes den exakta tidpunkten för störningen av en kontinuerlig rektangulärfördelning. För att inkludera maximal variation i resultaten upprepades varje scenario fem gånger. Även simulering av hur systemet påverkades av dessa scenarier vid ökad tåganvändning genomfördes. För simuleringarna av hur ökad tågandel skulle påverka systemet så höjdes andelen av den totala volymen som transporterades med tåg med fem procentenheter för södra Sverige och med sju procentenheter för norra Sverige. Produktionsplanen mönster behölls på i princip identisk nivå (Figur 3 och 4).

Tabell 4. De olika scenarier som simulerades

Table 4. The simulated scenarios

Scenario nummer	Simulerad störning	Omfattning	Tidpunkt
1	Ingen, grundfallet		
2	Tjällossning	En sänkning av flödet till väg- och terminallager med 25 % under två veckor på en nod åt gången.	Startar med biltransporter inom de första tio dagarna av mars för södra Sverige och april för norra Sverige. De övriga noderna följer i de kommande tiodagarsperioderna
3	Industrihaveri	Ett stopp av konsumtionen vid industri som varar i två veckor.	Mellan september och november

Tjällossningen som simuleras i scenario 2 startar vid kusten och rör sig inåt landet (jfr Figur 3 och 4). Denna påverkar inte transportererna från väg- och terminallager till industri utan uteslutande produktionen till noderna. Industrihaveriet som simulerades i scenario 3 påverkade de två industrierna oberoende av varandra. Båda industrierna påverkades i varje simulering.

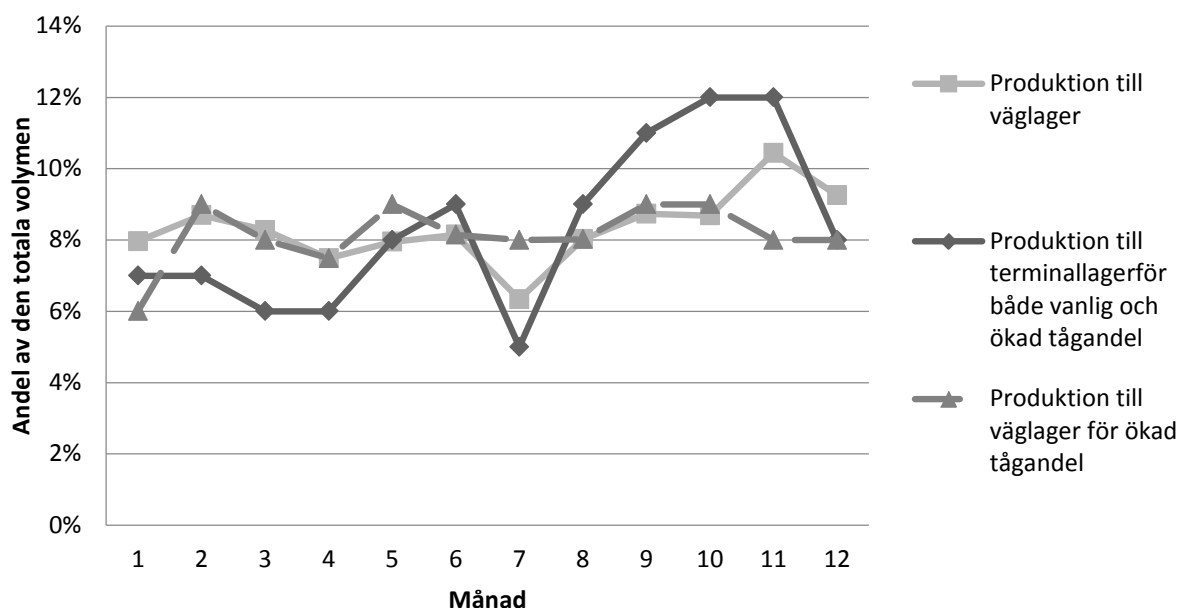
Resultaten av de olika scenariernas störningar kartlades under de två månader efter att störningsperioden börjat. Perioden var densamma för både grundsimuleringarna och de simuleringar som genomfördes med ökad tågandel. På grund av de olika klimatologiska förutsättningar som råder mellan norra och södra Sverige var perioden under vilken störningen från scenario 2 uppstod olika mellan de två systemen. Detta föranledde att även perioden under vilken resultaten redovisades justerades.

2.3 Produktions- och transportplanering för skapande av simuleringsinställningar

Utifrån materialet utformades en plan över flödet till väg- och terminallager för respektive system (Figur 5 och 6). Denna plan kommer i fortsättningen kallas för produktionsplan. Produktionsplanen utarbetades i samverkan med respondenter med stor insyn i hur

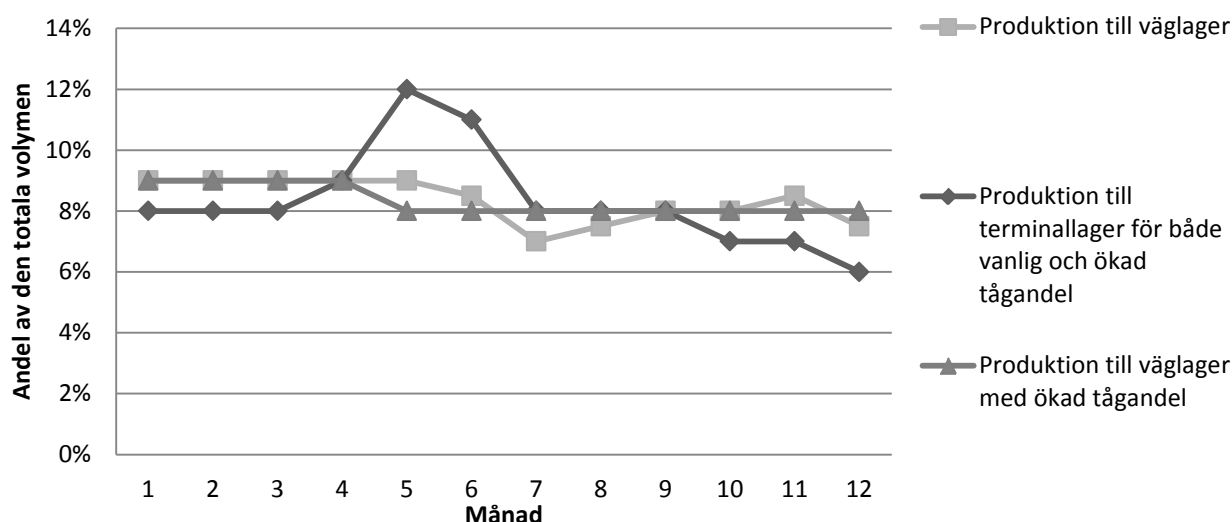
motsvarande verklig fördelning var (Frick 2014 pers. komm.; Pettersson 2014 pers. komm.; Sakari 2014 pers. komm.). I fortsättningen kommer dessa kallas respondenter.

Beräkningarna för behovet av transportkapacitet baserades på de totala volymer som planerades för levererans under året. De beräknade värdena testades och anpassades sedan utifrån provkörningar av simuleringsmodellen (Tabell 5). Innan dessa beräkningar genomfördes transformerades produktionsplanen till antal lastbilslass, detta för att minska komplexiteten i simuleringsmodellen. Beräkningen av tågkapacitet baserades på att ett tågs transportkapacitet motsvarade 26 lastbilslass. Den beräknade transportkapaciteten testades och anpassades sedan utifrån provkörningar av simuleringsmodellen.



Figur 5. Mönster för månatlig produktion till väg- respektive terminallager för norra Sverige uttryckt som en andel av den totala volymen.

Figure 5. Monthly production pattern to roadside and terminal stocks for the north of Sweden expressed as a proportion of the total volume.



Figur 6. Mönster för månatlig produktion till väg- respektive terminallager för södra Sverige uttryckt som en andel av den totala volymen.

Figure 6. Monthly production pattern to roadside and terminal stocks for the south of Sweden expressed as a proportion of the total volume.

Tabell 5. Använd mängd transportresurser för norra respektive södra Sverige
Table 5. Used amount of transport resources for the north and south of Sweden

Del av Sverige	Använd mängd bilar	Använd mängd tåg
Norra	34	1
Södra	67	2

För skapande av en transportplan beräknades väg- och terminallager för de olika tillgångsnoderna (B1, B2, T1 och T2) under varje månad utifrån produktionsplanen. Beräkningar genomfördes även av industrilager i varje månad (Bilaga 2). Industrierna antogs vara i balans med den totala transporterade virkesvolymen och vara jämn från dag till dag. Då industrierna hade lika stort råvarubehov användes denna transportplan för båda industrierna.

Transportplanen utformades genom linjärprogrammering med minimerad lagerförändring som målfunktion. Lagerförändring valdes som fokus i samverkan med näringen (Frick 2014 pers. komm. ; Sakari 2014 pers. komm.). I formuleringen av målfunktionen fixerades biltransporterna till att varje månad transportera till industri exakt den volym som produceras till väglager enligt produktionsplanen. Som beslutsparameter valdes därmed endast hur stor andel av årets totala volymer som skulle transporteras från terminallager till industri. Därigenom blev målfunktionen att minimera industrilagrets variation från månad till månad med justering av tågtransporterna (Formel 1). Som begränsningar sattes att industrilagret skulle hållas inom ett önskat intervall (1), variationen i transporterade volym från månad till månad skulle hållas inom ett önskat intervall (2) och att terminallagret inte fick vara negativt (3). Linjärprogrammeringen utfördes i Microsoft Excel 2010 med hjälp av tillägget ”problemlösaren”.

Formel 1.

Formula 1.

$$\min \sum_{p=1}^p \left(\sum_{n=1}^n (Vt_n * X_{np} + Vb_p) - K_p \right) - \left(\sum_{n=1}^n (Vt_n * X_{np-1} + Vb_{p-1}) - K_{p-1} \right)$$

Beskrivning av variabler i Formel 1:

Vt_n = Total virkesvolym transporterad med tåg från nod n

X_{np} = andelen av den totala volymen från nod n som transporteras i period p

Vb_p = virkesvolymen transporterad med bil i period p

K_p = konsumtionen i månad p

IL_p = industrilager i månad p

L_{np} = lager vid nod n i månad p

Med begränsningarna:

$$(1) IL_{min} < IL_p < IL_{max}$$

$$(2) \Delta X_{min} < \Delta X_{np} < \Delta X_{max}$$

$$(3) L_{np} > 0$$

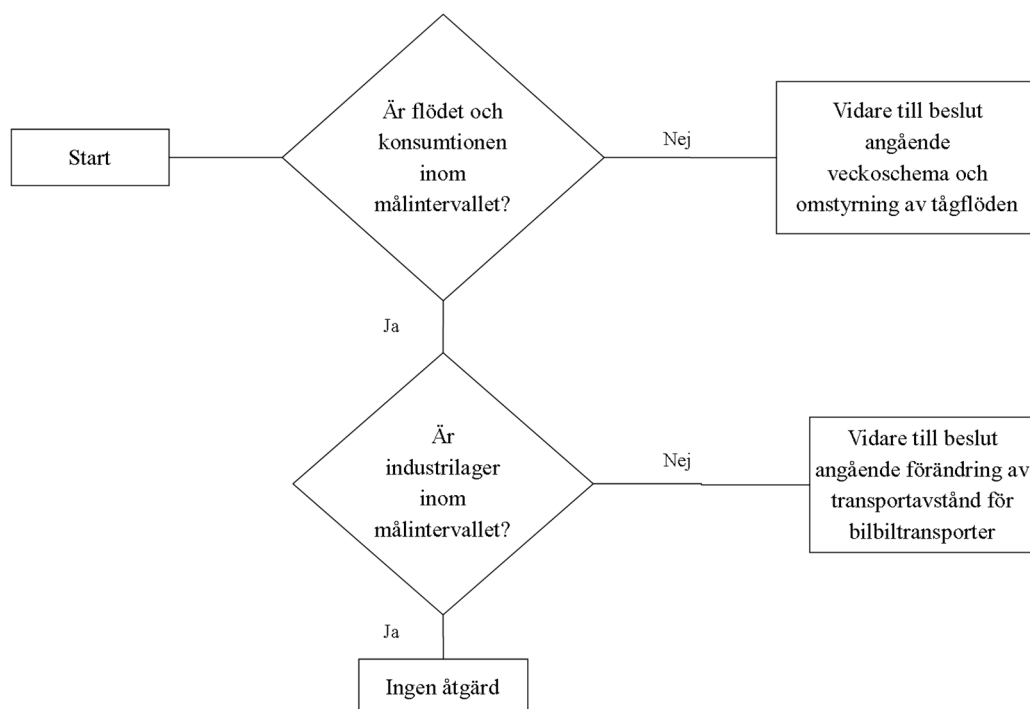
För att skapa variation mellan upprepningarna kompletterades transportplanen med stokastiska parametrar för transporttid och konsumtion. Dessa utgjordes av att tiden för transport med bil varierades ± 25 % från det förväntade värdet med en kontinuerlig rektangulärfördelning. Tiden för tågtransporter varierades mellan -25 % och $+35$ % genom en stegvis empirisk sannolikhetsfördelning (empirical stepped distribution). Fördelningar av bil- och tågtransporttid baserades på upptagningsområdenas geometri enligt Sundberg &

Silversides (1988) för att motsvara fördelningen av transportavstånd inom upptagningsområdena. Dessutom varierades industrikonsumtionen $\pm 15\%$ genom en kontinuerlig triangulär fördelning (enligt Bengtsson 2014). Dessa fördelningar medförde grova uppskattningar, men de var de bästa tillgängliga för att skapa stokastisk variation i transport- och konsumtionstid.

När alla inställningar var på plats skapades en simuleringsmodell. Denna lades upp så att de båda systemen integrerades i en modell för att undvika skapandet av två olika modeller. Detta innebar att simuleringsmodellen kombinerade de två systemens egenskaper och det ena systemet inaktiverades vid simulering av det andra.

2.5 Styrningslogik

För att allokeringen av transportresurser skulle vara realistisk krävdes också en rad regler för hur olika kombinationer av systemvariabler hanterades. Dessa regler formulerades i samverkan med respondenterna (Frick 2014 pers. komm.; Pettersson 2014 pers. komm.; Sakari 2014 pers. komm.) för att styrningslogiken skulle motsvara verkligheten i så stor utsträckning som möjligt. Resultatet av detta blev en veckovis allokering av transportresurser utifrån industrilagrets nivå och utveckling samt flödet in till industri i förhållande till transportplanen. Även industrins konsumtion togs i åtanke (Figur 8). I allokeringen av transportresurser fanns tre principiellt skilda beslut, nämligen att förändra biltransportkapaciteten, justera schemaläggningen för tågtransporterna samt att styra om tågtrafiken mellan industrierna (Tabell 6, 7, 8 och 9). Dessa tre beslut användes för att parera olika stora avvikelser. De två tågallokeringsbesluten användes huvudsakligen för stora skillnader och bilallokeringsbesluten huvudsakligen för finjusteringar.



Figur 7. Flödeskarta över omallokeringsbeslut av transportresurser som användes i simuleringsmodellen.

Figure 7. Flow chart of the reallocation decisions that were used in the simulation model.

Tabell 6. Lista över variabler som används i omallokeringsbesluten för bil- och järnvägstransporter samt deras förkortningar

Table 6. List of variables used in the allocation decisions for truck and railway transport and their abbreviations

Förkortning	Beskrivning av variabel
VL_{np}	Väglager i nod n i månad p
TL_{np}	Terminallager i nod n under månad p
IL_{ip}	Industrilager vid industri i under månad p
ILU_{ip}	Industrilagrets utveckling vid industri i under månad p
F_{ip}	Flöde till industri i under månad p
K_{ip}	Konsumtionen vid industri i under månad p

Tabell 7. Beslutsmatris för omallokering av bilresurser mellan distrikt med långt kontra kort transportavstånd. Att en grupp styrs om till att köra långt innebär en förlängning av medeltransportavståndet med 20 km (ca 20 %)

Table 7. Decision matrix for reallocating truck resources. Reallocating a group to drive far implies that the transport distance is increased by 20 km (approximately 20 %)

Systemstatus	Variabel			Beslut
	IL_{ip} , dagar	ILU_{ip}	VL_{np}	
Fall 1	> 13		> 0	Kör samtliga grupper långt
Fall 2	> elva	> 0	> 0	Kör samtliga grupper långt
Fall 3	> elva	< 0	> 0	Kör två av tre grupper långt
Fall 4	< sju	< 0	> 0	Kör två av tre grupper kort
Fall 5	< fem		> 0	Kör samtliga grupper kort

Tabell 8. Beslutsmatris för justering av veckoplanen för tågresurser utifrån systemstatus. Beslutet resulterar i antal veckodagar tågtrafik tillåts

Table 8. Decision matrix for adjustment of the weekly planning of train resources based on system status. This results in the number of weekdays that train traffic is allowed

Systemstatus	Variabel				Beslut
	F_{1p}	F_{2p}	IL_{ip} , dagar	TL_{np} , antal tåg	
Fall 1	> konsumtionen		> tio		Kör måndag – fredag från T1
Fall 2		> 22 % under plan	> tio		Kör måndag - lördag från T1
Fall 5	< konsumtionen			> två	Kör måndag -lördag från T1
Fall 4	>5 % under plan			> ett	Kör måndag - lördag från T1
Fall 6	>10 % under plan			> två	Kör måndag - söndag från T1
Fall 7	< konsumtionen			> tre	Kör måndag - söndag från T1
Fall 3		> 23 % under plan	> tio		Kör måndag - lördag från T2
Fall 8	>15 % under plan			> ett	Kör måndag - lördag från T2
Fall 9	< konsumtionen			> två	Kör måndag - lördag från T2
Fall 10	>20 % under plan			> två	Kör måndag - lördag från T2
Fall 11	< konsumtionen			> tre	Kör måndag - söndag från T2

Tabell 9. Beslutsmatris för omstyrning av tågtransporter mellan mottagare utifrån systemstatus
Table 9. Decision matrix for rerouting of train resources based on system status

Systemstatus	Variabel				Beslut
	F _{1p}	F _{2p}	K _{1p}	IL _{ip} , dagar	
Fall 1	> konsumtionen		> K2	> tio	Styr om T1 till alternativ industri
Fall 2		>22 % under planen		> tio	Styr om T1 till alternativ industri
Fall 3		>23 % under planen		> tio	Styr om T2 till alternativ industri

2.6 Validering

Efter provkörningar av simuleringsmodellen genomfördes en validering av de ingående delarna. I vilken grad transportplanen och styrningslogiken motsvarade verkliga exempel validerades genom diskussioner med personer som har stor insyn i hur kombinerade transporter planeras och styrs (Frick 2014 pers. komm.; Pettersson 2014 pers. komm.; Sakari 2014 pers. komm.). Valideringen genomfördes med störst vikt på transportmönster och i vilka lägen olika beslut togs.

Den validerade transportplanen och styrningslogiken låg sedan till grund för valideringen av simuleringsresultaten. Denna genomfördes genom att likheter och skillnader mellan det förväntade och faktiska resultatet sammanställdes och vägdes mot varandra. Genom detta blev det möjligt att bedöma hur realistiska simuleringsresultaten var. Bedömningen att detta var en tillräcklig validering grundade sig i att alla ingående parametrar i simuleringsresultaten tidigare hade validerats enskilt.

2.7 Kartläggning av servicenyckeltal

För kartläggning av simuleringsresultatet valdes tre servicenyckeltal som skulle mätas i samtliga simuleringar. Dessa var leveransprecision, lager och ledtid. Nyckeltalen valdes för kartläggning då de är det effektivaste sättet att följa upp målet i de olika nivåerna av kundanpassning som presenteras av Andrén & Fjeld (2004). Förutom detta är dessa nyckeltal de mest använda nyckeltalen för uppföljning i rundvirkesförsörjning (Andrén & Fjeld 2004; Carlsson & Rönqvist 2005; Puodziunas & Fjeld 2008; Zilo 2013).

Leveransprecision beräknades enligt Formel 2. Detta arbetssätt användes då det framförallt är den procentuella avvikelsen från konsumerad volym med hänsyn tagen till önskad lagerjustering som var av intresse för att mäta hur väl styrningslogiken parerar de olika scenarierna. Beräkningar av leveransprecision gjordes på månadsnivå då önskad lagerjustering inte beräknades med kortare tidshorisont.

Formel 2.

Formula 2.

$$LP_{int\%} = (V_{lev} / V_{kons} \pm L_{just}) - 1$$

Beskrivning av variabler i Formel 2:

LP_{int%} = Intern leveransprecision, beskriven som procentuell avvikelse från målet

V_{lev} = Levererad volym av önskat sortiment, beräknades i lastbilslass

V_{kons} = Konsumerad volym av önskat sortiment, beräknades i lastbilslass

L_{just} = Önskad justering av lagernivåer, beräknades i lastbilslass

Lagret kartlades både som absoluta volymer och uttryckt som täcktid. Täcktid definierades som antalet dygn av normal konsumtion som lagret räcker till (Hägg 1991). Då hela försörjningskedjan var av intresse lades samtliga lager samman i denna jämförelse. Lagret kartlades som täcktid för att det på ett enkelt sätt skulle kunna jämföras mot ledtiderna. Ledtiderna kartlades som transportledtid.

Nyckeltalen kartlades genom att medianer och kvartiler jämfördes mellan de olika scenarierna. Kartläggningen gjordes grafiskt, primärt genom histogram, låddiagram och spridningsdiagram. Detta genomfördes i Minitab 16 (Minitab statistical software 2010).

Som avslutande del i arbetet genomfördes kartläggning för att visualisera vilka inbördes samband som finns mellan de olika servicedimensionerna. Kartläggning genomfördes först för grundfallet och sedan för scenario 2 och scenario 3. För grundfallet delades kartläggningen upp i två delar efter transportsätt. För de volymer som transporterades med bil så ställdes ledtiden upp mot väglagret och för de volymer som transporterades med tåg ställdes ledtiden upp mot terminallagret. I de kartläggningar som genomfördes för scenario 2 och scenario 3 användes dock sammanlagda ledtider och sammanlagda lager.

3 Resultat

I detta avsnitt kommer först resultatet från grundfallet presenteras och valideras. Därefter kommer detta jämföras mot resultatet från scenario 2 och scenario 3, både för grundsimulering och för simulering av ökad tågandel. Slutligen kommer samband mellan de olika nyckeltalen att presenteras, med störst vikt på lager och ledtid.

3.1 Grundscenariot, säsongsmonster och fördelning

Under simuleringsperioden uppmättes stora variationer i samtliga nyckeltal och mellan de två systemen (Figur 9 och 10). För systemet som representerar norra Sverige visar mönstret för leveransprecision (leveransprecision i Figur 9) att det finns överleveranser under årets början och i augusti till oktober. Juni och juli uppvisar däremot underleveranser av betydande storlek ($>10\%$ avvikelse). Under april och maj samt november och december syns vissa underleveranser men de är huvudsakligen inom $\pm 10\%$ (leveransprecision i Figur 9). För systemet som representerar södra Sverige (leveransprecision i Figur 10) finns också överleveranser under augusti till oktober. Gemensamt för de två systemen är även att januari uppvisar stora överleveranser ($>20\%$ avvikelse). Förutom detta finns det för systemet som representerar södra Sverige betydande underleveranser i mars, april, november och december. Även juni och juli uppvisar underleveranser, men dessa hålls inom $\pm 10\%$ i alla fall utom ett. För februari och maj är leveransprecisionen hög, med endast några få procents avvikelse från målet (leveransprecision i Figur 10). I de flesta fall hänger överleveranser ihop med en ökning av leveransmålet enligt plan för båda systemen. Motsvarande tendenser finns för underleveranser och en sänkning av leveransmålet enligt plan (jfr leveransmål enligt plan och leveransprecision i Figur 9 och 10).

Utvecklingen av sammanlagda lager för systemet som representerar norra Sverige är genomgående lika den planerade lagernivån men fördelningen mellan dessa lager är relativt långt från den planerade då väglagret i planen var fixerat till ca tre dagars täcktid (jfr lager enligt plan och lager i Figur 9). Dock finns samma mönster i simuleringsresultatet som i planen, med en sänkning under sommaren, en ökning under hösten och en relativt jämn nivå under vinter och vår. Den sammanlagda lagerutvecklingen för det system som representerar södra Sverige följer även den planen på ett realistiskt sätt (jfr lager enligt plan och lager i Figur 10) men en stor del av den lagerökning som var planerad fram till juni har förflyttats till väglagret. I och med att väglagret även här var fixerat till ca tre dagars täcktid råder liknande felaktigheter i fördelningen mellan de olika lagren i detta system. I båda systemen är industrilagret mer begränsat i simuleringsresultatet än vad det är enligt planen (jfr lager enligt plan och lager i Figur 9 och 10). Detta är en av de planerade effekterna av modellens styrningslogik.

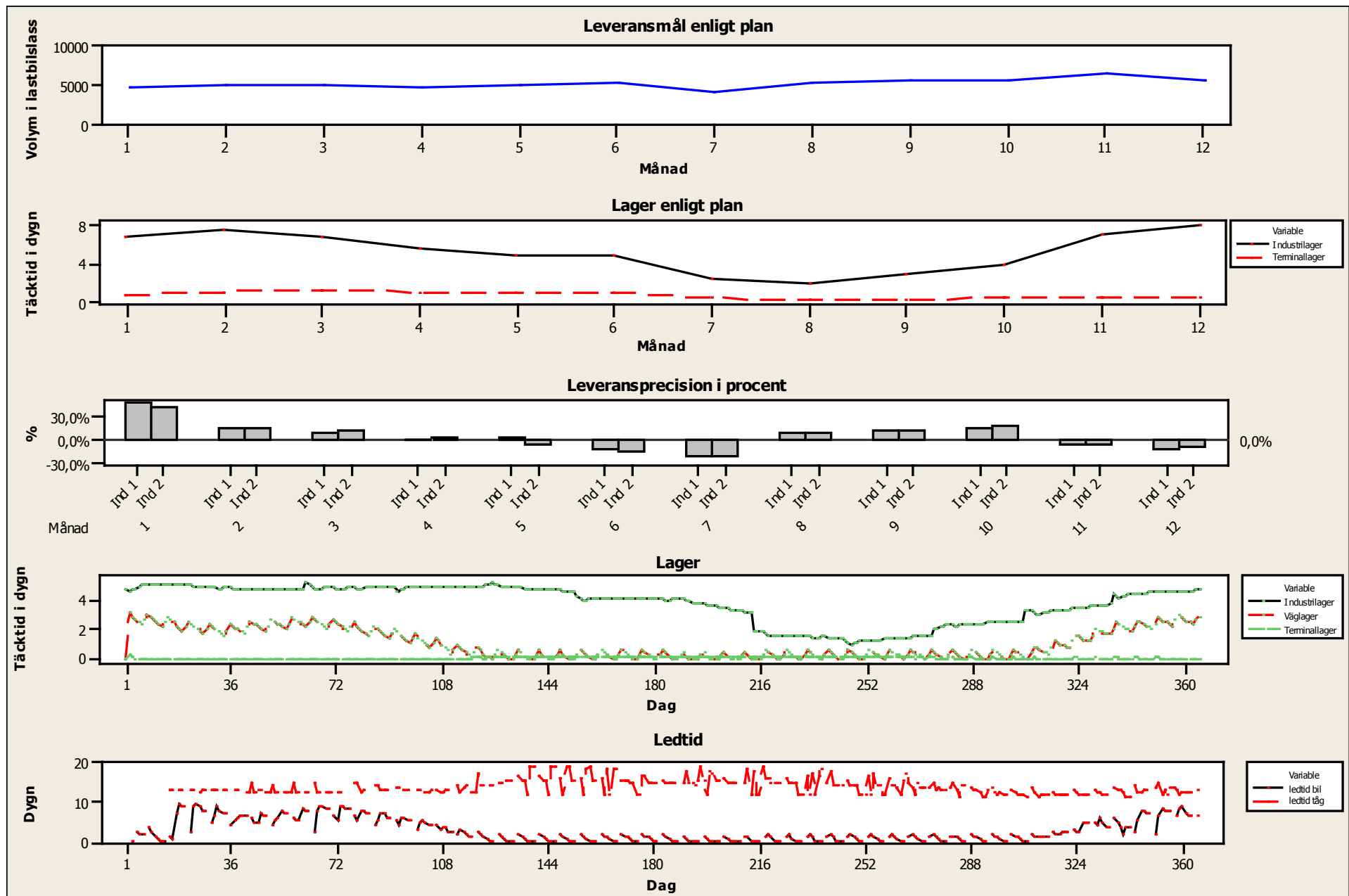
Ledtidens utveckling i de båda systemen följer i princip väg- och terminallagrets utveckling (jfr lager och ledtid i Figur 9 och 10) och ligger i genomsnitt lägre för de volymer som transporterats med bil än de som transporterats med tåg, vilket var väntat. Detta tyder på att ett samband finns mellan lager och ledtider. Då leveransprecision beror på konsumtion, leveranser och lagerjustering styrs den delvis av lagervolymen genom att lagervolymen är en funktion av produktionen till lagren och leveranserna till industri. Under en period under sommaren och hösten ökar variationen i ledtiderna för tåg för systemet som representerar norra Sverige (jfr ledtid tåg i Figur 9). Ytterligare kartläggning av dessa effekter presenteras i avsnitt 3.3.

I grundscenariot fanns betydande likheter mellan planen och simuleringsresultaten men det fanns även ett antal skillnader (Tabell 10). Mest betydande skillnader fanns för leveransprecision, där överleveranser tenderar att hänga ihop med ökningar av de planerade leveranserna. Samma tendenser syns för underleveranser och sänkningar av de planerade leveranserna. Skillnaderna som identifierades i lagernivåer består endast i att fördelningen av de olika lagren avviker från planen.

Tabell 10. Huvudsakliga skillnader och likheter mellan plan och simuleringsresultat som identifierades i valideringen

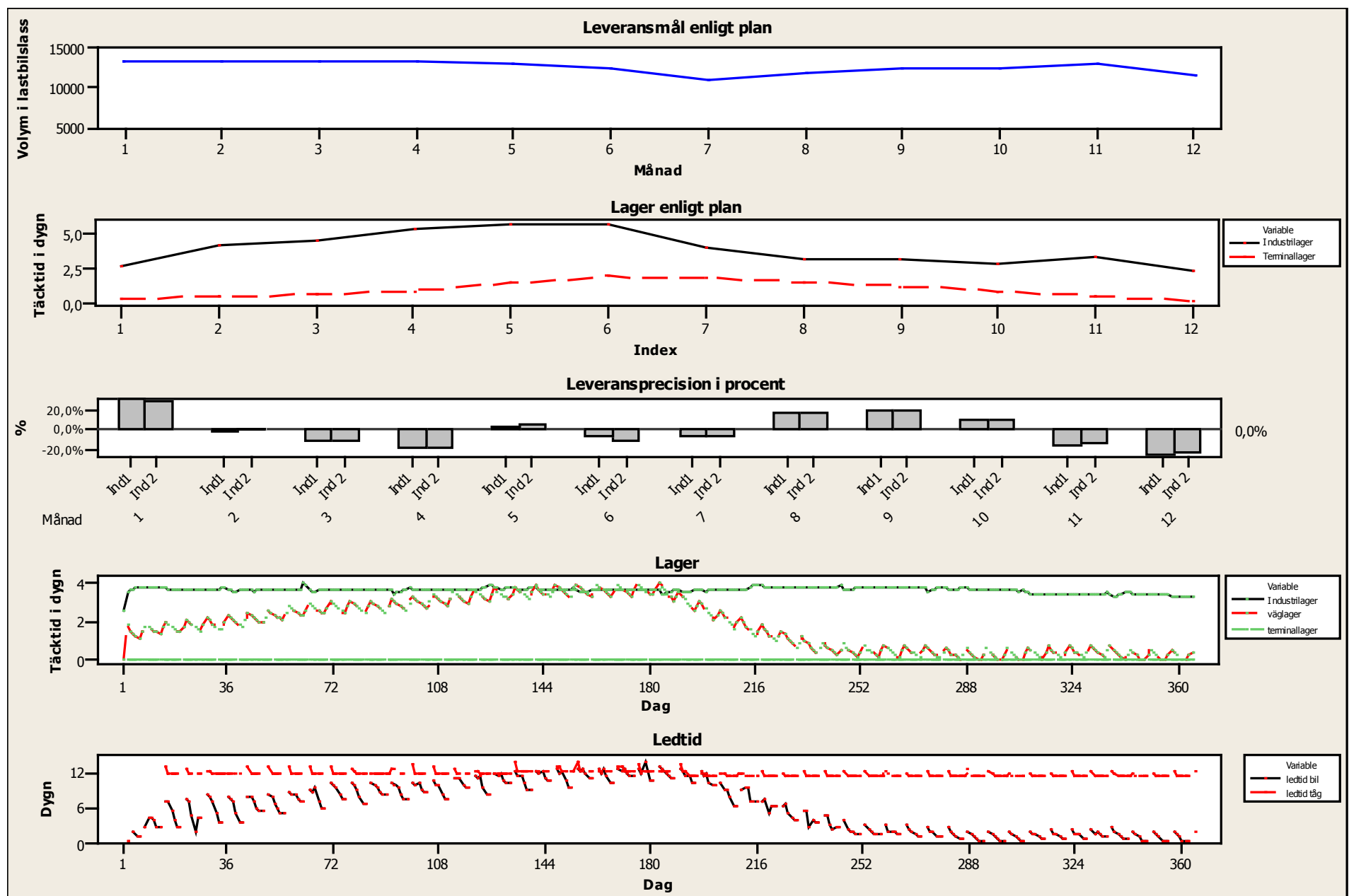
Table 10. Main differences and similarities between the planned values and the simulation results identified in the validation

Nyckeltal	Likhet	Skillnad
Leveransprecision	Liknande sekvenser finns i leveransprecision och planerade leveranser men något förskjutet och förstärkt Leveransprecisionen är snarlik mellan de två industrierna	Simuleringsmodellen skapar ofta en underleverans när planerade leveranser sjunker. Detta tyder på att modellen överreagerar Kraftiga överleveranser i januari för båda systemkonfigurationerna och underleveranser i december för systemet som representerar södra Sverige
Lager	Det sammanlagda lagret har samma mönster i planen och simuleringsresultatet	Fördelningen mellan olika lager är skev då otillräckliga möjligheter att begränsa transportkapacitet finns i planeringslogiken



Figur 8. Planerade värden (leveransmål och lager enligt plan) och simuleringsresultat (leveransprecision, lager och ledtid) för systemkonfigurationen med fyra terminaler i norra Sverige. Simuleringsresultaten redovisas som medianvärde av de fem upprepningarna.

Figure 8. Planned values (delivery goals and planned stock) and simulation results (delivery precision, stock and lead times) for the system with four terminals representing the north of Sweden. The simulation results are shown as a median value of the five runs.

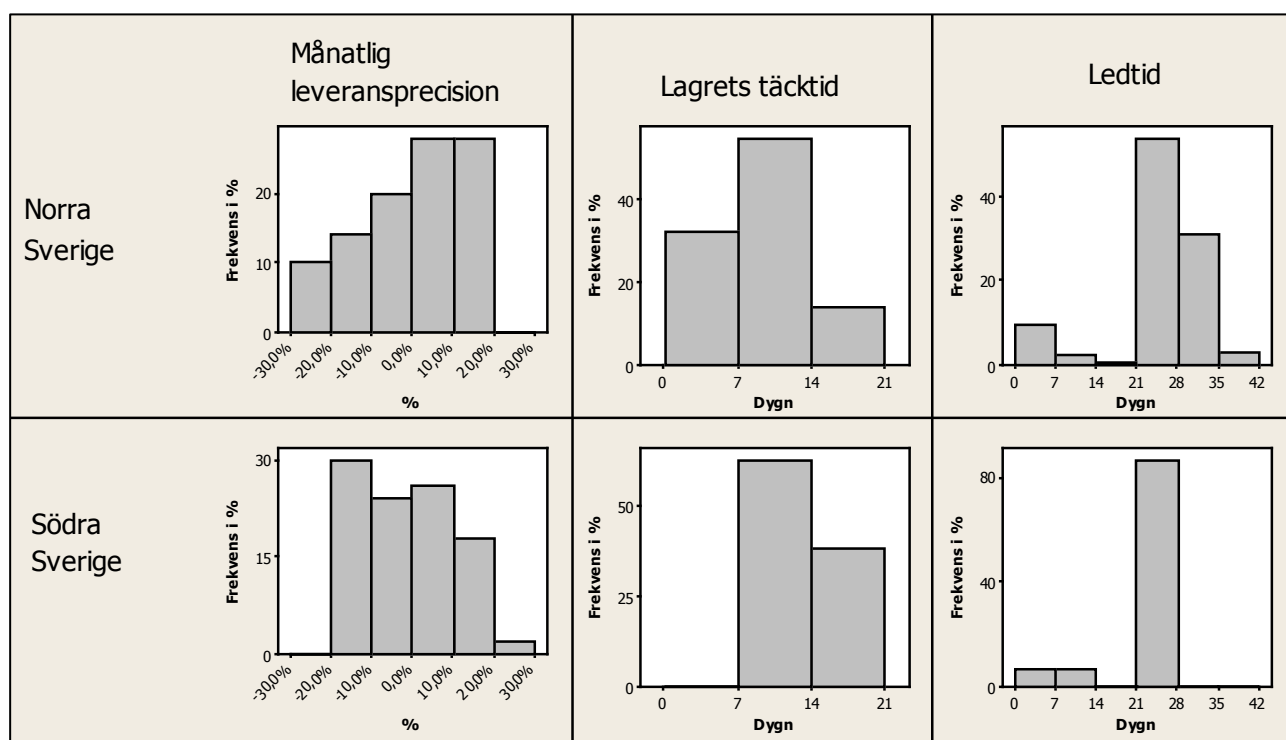


Figur 9. Planerade värden (leveransmål och lager enligt plan) och simuleringsresultat (leveransprecision, lager och ledtid) för systemkonfigurationen med fyra terminaler i södra Sverige. Simuleringsresultaten redovisas som medianvärde av de fem upprepningarna.

Figure 9. Planned values (delivery goals and planned stock) and simulation results (delivery precision, stock and lead times) for the system with three terminals representing the south of Sweden. The simulation results are shown as a median value of the five runs.

3.1.2 Nyckeltalens fördelning

Utöver de olika nyckeltalens säsongsmönster kartlades deras fördelning (Figur 11). För leveransprecisionen i systemet som representerar norra Sverige en hög frekvens av betydande överleveranser och en låg frekvens av betydande underleveranser medan det omvända gällde för systemet som representerar södra Sverige. De två systemen hade dock ungefär lika stor variation i leveransprecision (jfr månatlig leveransprecision i Figur 11). Det sammanlagda lagrets variation var större i systemet som representerar norra Sverige (jfr lagrets täcktid i Figur 11). Ledtiden uppvisade även den en större variation för systemet som motsvarar norra Sverige än det som motsvarar södra Sverige (jfr ledtid i Figur 11). Att ökad variation i lager även medför ökad variation i ledtider tyder på att det finns ett samband mellan dem.



Figur 10. Nyckeltalens fördelning i grundfallet för systemkonfigurationerna som representerar södra och norra Sverige. Lagret är en summa av samtliga lager i systemet (anges som antal dygns täcktid) och ledtiden är ett viktat medelvärde av ledtiden för bil och tåg, vikterna är volymen per enhet.

Figure 10. The distribution of the key performance indicators for the system configurations representing the north and south of Sweden. The stock is a sum of all stocks in the system (shown as number of days cover time) and the lead times are a weighted average of the lead time for truck and train.

3.2 Jämförelse av nyckeltal för servicedimensioner mellan scenarier

Jämförelsen av de olika scenarierna genomfördes under de två månader som följer efter att störningsperioden har initierats. Detta gjorde att perioden under vilken scenario 2 jämfördes mot grundfallet är olika för de två systemen. Perioden under vilken scenario 3 jämfördes mot grundfallet är dock densamma för de båda systemen. Det medförde även att grundsimuleringarna och simuleringarna med ökad tågandel jämfördes under samma period för båda scenarierna. Jämförelserna gjordes med hänseende på intern leveransprecision (Formel 2), sammanlagda lager och transportledtid.

3.2.1 Leveransprecision

Under perioden som scenario 2 (tjällossning) kartlades uppvisade båda systemen underleveranser (jfr månatlig leveransprecision i Figur 12 och 13). Dessa var dock mindre för systemet som representerade norra Sverige än systemet som representerade södra Sverige. Scenario 2 har ingen synlig effekt på leveransprecision i de flesta fall. I perioden som scenario 3 (industrihaveri) redovisas uppvisar samtliga simuleringar överleveranser. Scenario 3 har en tydligare effekt på leveransprecision än scenario 2 då överleveransen ökar kraftigt (jfr månatlig leveransprecision i Figur 12 och 13). Ökningen av överleveransen är dock mindre i simuleringen med ökad tågandel för båda systemen (jfr övre boxarna längst till höger i Figur 12 och 13). Utifrån detta utfördes kartläggning om hur stor reduktionen av överleveranserna var i simuleringarna med ökad tågandel (Figur 14). I dessa framkom att minskningen av överleveranserna mellan grundsimuleringen och simuleringen med ökad tågandel var ungefär lika stora men att överleveranserna är generellt mindre i det system som representerar södra Sverige.

3.2.2 Lagernivå

Under perioden som scenario 2 kartläggs ligger det sammanlagda lagrets täcktid för båda systemen runt 12 dagar i grundsimuleringen. I simuleringarna med ökad tågandel är lagren generellt något lägre (jfr lagrets täcktid i Figur 12 och 13). Effekten av scenario 2 på lagrets täcktid är dock mycket liten i samtliga fall.

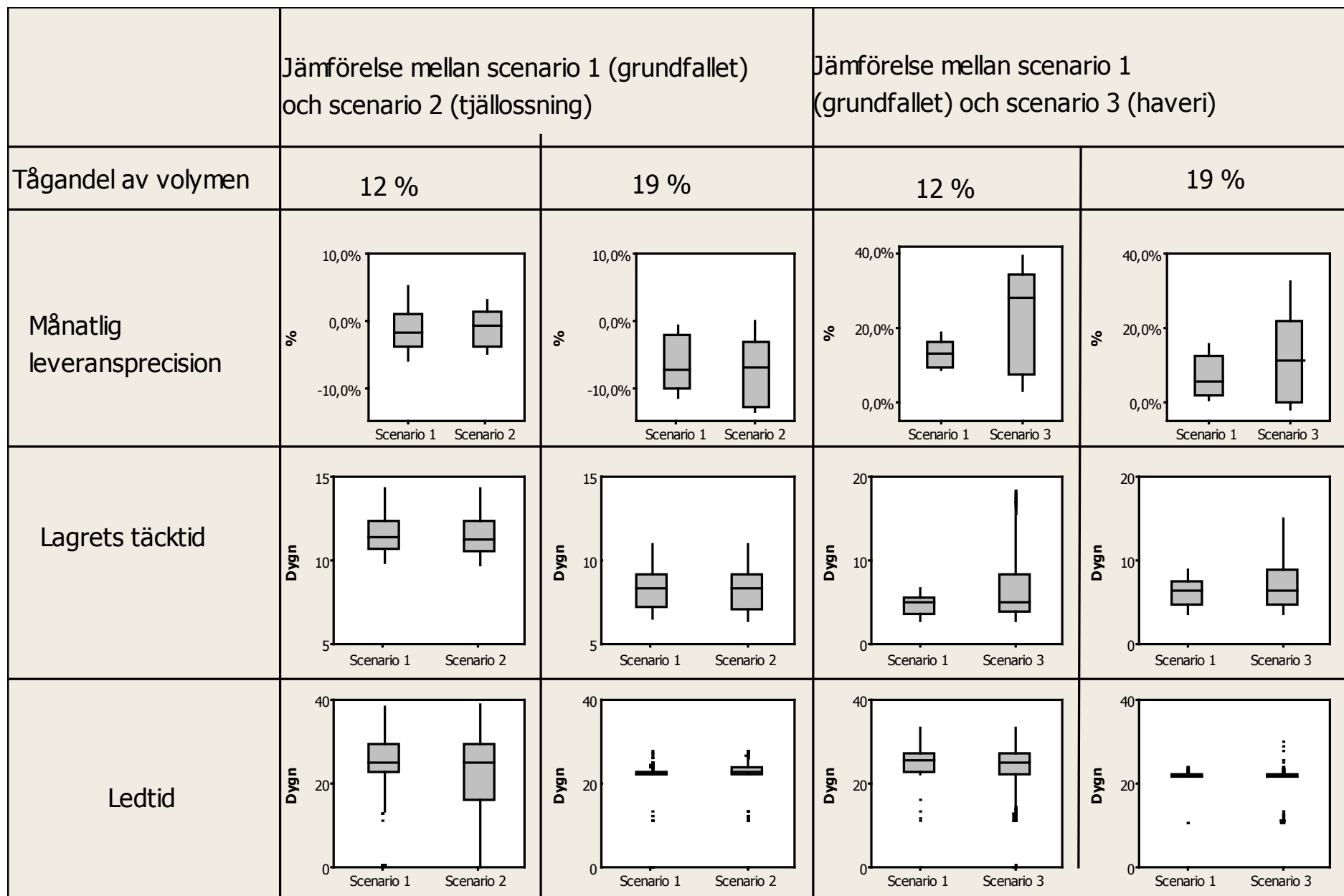
I den period som scenario 3 kartläggs är lagren lägre, de ligger på ungefär hälften av den nivå som syns i perioden då scenario 2 kartlades (jfr mellersta raden i Figur 12 och 13). Skillnad mellan grundsimuleringen och simuleringen med ökad tågandel för systemet som representerar norra Sverige är dessutom betydligt mindre än under perioden som scenario 2 kartläggs (jfr den mellersta raden i Figur 12). I systemet som representerar södra Sverige är dock skillnaden mellan grundsimuleringen och simuleringen med ökad tågandel ungefär lika stor som under perioden då scenario 2 kartläggs (jfr den mellersta raden i Figur 13). Effekten av scenario 3 på lagrets täcktid är i princip densamma i samtliga fall, dvs. att spridningen i övre kvartilen ökar (jfr den högra halvan av lagrets täcktid i Figur 12 och 13).

3.2.3 Ledtider

Ledtidens medianvärde är ungefär detsamma i samtliga fall. Grundsimuleringen i det system som representerar norra Sverige sticker dock ut med att ligga något högre och ha större variation för både scenario 2 och scenario 3 (jfr den understa raden i Figur 12 och 13).

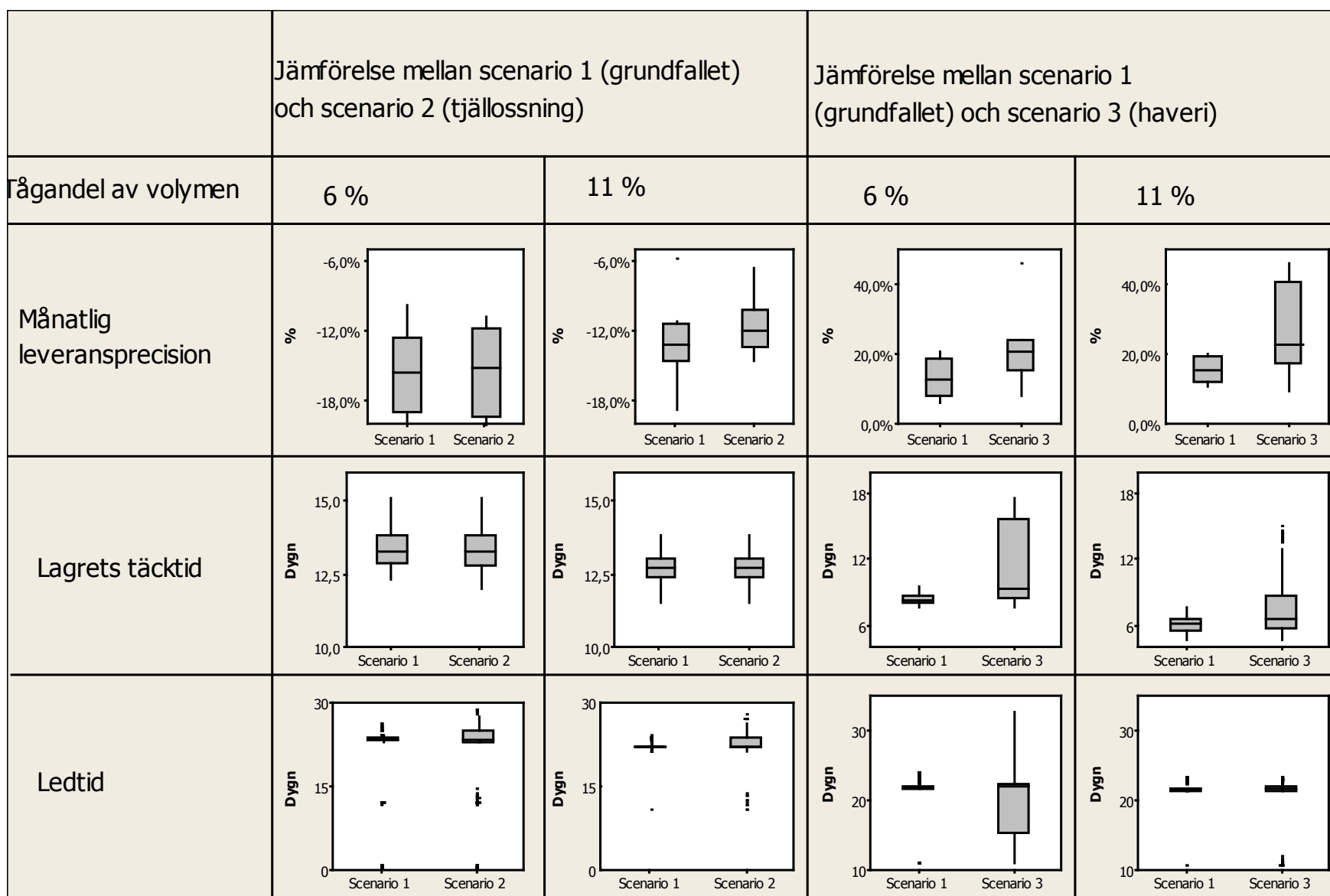
Effekterna av både scenario 2 och scenario 3 på ledtid är att variationen i samtliga fall ökar. Störst effekt syns för scenario 3 i systemet som representerar södra Sverige och därefter kommer scenario 2 i systemet som representerar norra Sverige (boxarna längst ner till höger i

Figur 13 och boxarna längst ner till vänster i Figur 12). För båda systemen gäller att variationen i ledtid är mindre än fem dygn för simuleringarna med ökad tågandel (jfr kolumnerna med 18 % tågandel i Figur 12 och kolumnerna med 12 % tågandel i Figur 13). Att scenario 3 får effekten att både lagernivåernas och ledtidernas variation ökar tyder på att dessa hänger ihop.



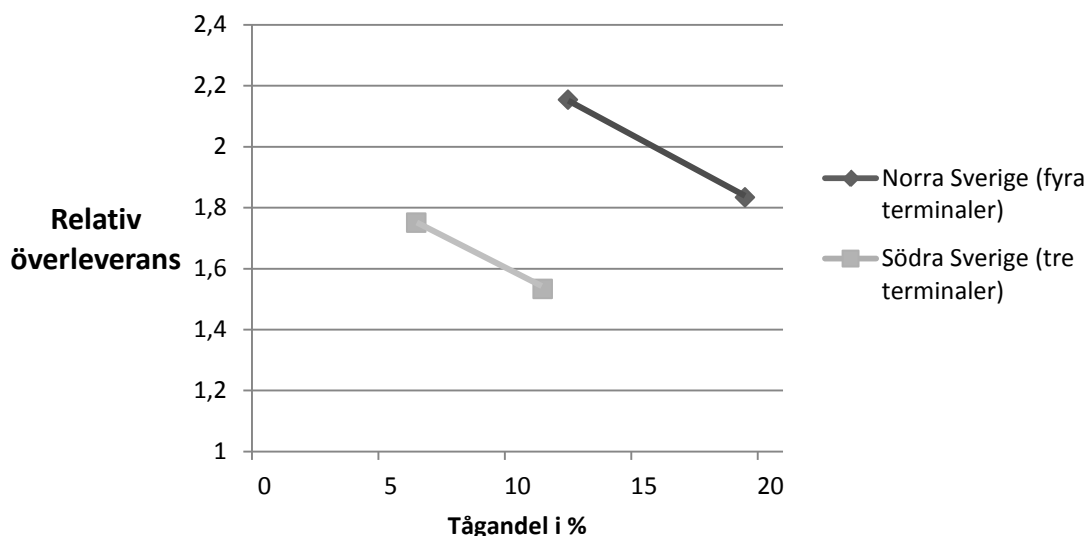
Figur 11. Jämförelse av de olika nyckeltalen (leveransprecision, lager, ledtid) mellan scenarier uppdelad på grundsimuleringen och simulering av ökad tågandel för norra Sverige. Lådornas undre gräns är den undre kvartilen, strecket i mitten är medianvärdet och lådornas övre gräns är den övre kvartilen. Strecken utanför lådorna omfattar de öriga värdena undantaget uteliggare, som betecknas med punkter.

Figure 11. Comparison of the different key performance indicators (delivery precision, stocks and lead time) for scenarios and their effects on the base case and the simulations with increased railway transport for the north of Sweden. The upper limit of the boxes are the upper quartile, the line inside is the median value and the lower limit is the lower quartile. The whiskers encompass the other values with the exception of outliers, which are shown as dots.



Figur 12. Jämförelse av de olika nyckeltalen (leveransprecision, lager, ledtid) för scenarier och deras effekt på för grundsimuleringen och simulering av ökad tågandel för södra Sverige. Lådornas undre gräns är den undre kvartilen, strecket i mitten är medianvärdet och lådornas övre gräns är den övre kvartilen. Strecken utanför lådorna omfattar de öriga värdena undantaget uteliggare, som betecknas med punkter.

Figure 12. Comparison of the different key performance indicators (delivery precision, stocks and lead time) for scenarios and their effects on the base case and the simulations with increased railway transport for the south of Sweden. The upper limit of the boxes are the upper quartile, the line inside is the median value and the lower limit is the lower quartile. The whiskers encompass the other values with the exception of outliers, which are shown as dots.



Figur 13. Reduktionen av relativ överleverans mellan scenario 3 (haveri) och grundfallet för grundsimuleringen och ökad tågandel. Relativ överleverans är beräknad som kvoten mellan överleveransen i scenario 3 och överleveransen i scenario 1

Figure 13. The reduction of relative overdelivery between scenario 3 (breakdown) and the base case for the base simulation and the simulations with increased railway transport. Relative overdelivery is calculated by dividing the overdelivery in scenario 3 with the overdelivery in scenario 1.

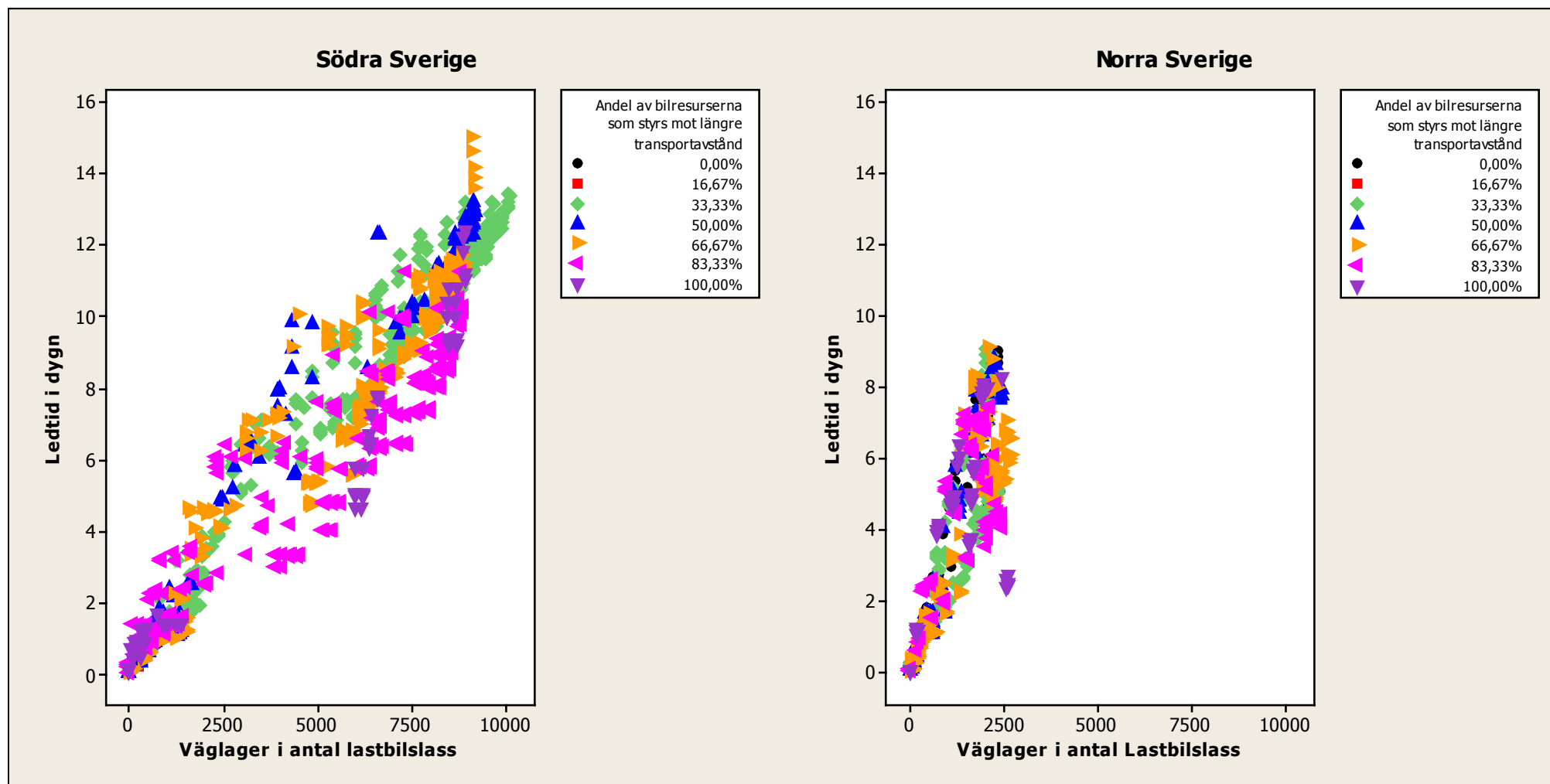
3.3 Samband mellan nyckeltal för servicedimensioner

För de volymer som transporteras med bil ökar ledtiden proportionellt mot ökande väglager (Figur 15). I och med att volymen som finns i väglager är mycket större i det system som motsvarar södra Sverige blir omfattningen i detta system större. Detta gör att sambandet för de olika systemen egentligen är ett och samma, men olika delar visas. Systemet som representerar norra Sverige har dock en brantare utveckling än det som motsvarar södra Sverige.

Sambandet mellan ledtider för de volymer som transporteras med tåg och terminallager liknar det som finns mellan ledtid för de volymer som transporteras med bil och väglager (Figur 16). Dock syns två grupper av värden med olika samband (jfr cirkelarna i Figur 16). Dessa grupper återfinns för båda systemen och, liksom för biltransporterna, har de två systemen samma utvecklingsmönster, men med olika nivåer. Dessa två grupper har en tydlig skillnad i antalet tåg som körs per dag där den ena innehöll observationer med mellan noll och fyra tåg per dag medan den andra huvudsakligen innehöll observationer med mer än fyra tåg per dag för systemet som representerade norra Sverige. För södra Sverige var grupperna mer lika, men den övre gruppen innehåller en större andel observationer med lågt antal tåg per dag (jfr cirkelarna i Figur 16). Påverkan av terminallagrets storlek blev störst när den passerade 100 lastbilslass, vilket ungefär var det samma som fyra tåglaster (jfr den streckade cirkeln i Figur 16). Detta hängde dessutom samman med en period under sommaren hösten då flödena till terminallager är högre än normalt (jfr Figur 5). Det är även under denna period som ledtiderna för tåg är ojämnare (jfr Figur 9)

Tjällossning (Scenario 2) (Figur 17) påverkade framförallt genom att det gav en förskjutning av enskilda observationer mot lägre lager och högre ledtid jämfört med de värden de hade i

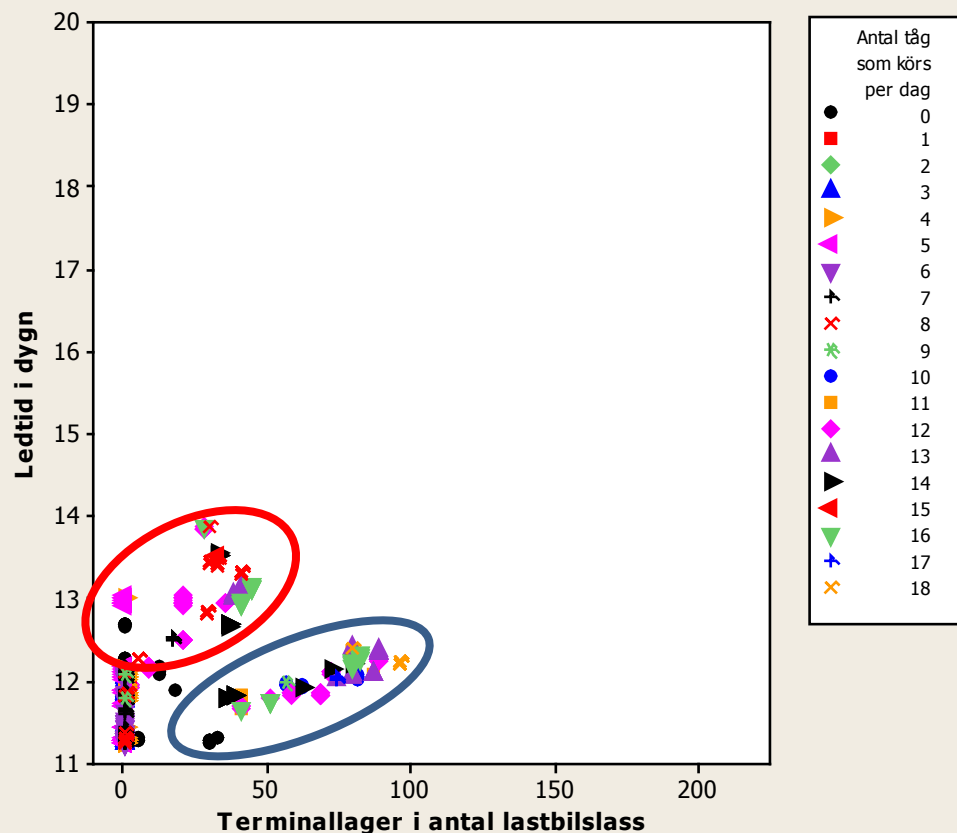
scenario 1 (jfr röda och svarta kors i Figur 17) som inte är tydligt i mer övergripande analyser (Figur 12). Scenario 3 (Figur 18) gav en tydligare påverkan av lagernivåerna genom att konsumtionen minskade till hälften eller minskade till noll beroende på om en eller båda industrierna påverkades. Detta medförde att två grupper av observationer med betydligt högre lagernivåer kunde urskiljas i resultatet (jfr de svarta och röda cirkelarna i Figur 18). Förutom dessa effekter finns för båda scenarier grupper med skilda ledtider i resultatet (jfr rektangelarna i Figur 17 och 18). Gruppen med lägre ledtider utgörs av de observationer där endast ett fåtal tåg har anlänt till industrin och därmed hamnar värdena närmare genomsnittet i ledtiderna för bil. Här syns också ett svagt samband mellan lager och ledtid (jfr linjerna i Figur 18).



Figur 14. Samband mellan lettid och lager för södra och norra Sverige i grundfallet. Värdena är uppdelade efter hur stor andel som kör mot B2.

Figure 14. The correlation between lead times and roadside stocks for the south and north of Sweden. The values are grouped by proportion of the resources driving to B2.

Södra Sverige



Norra Sverige

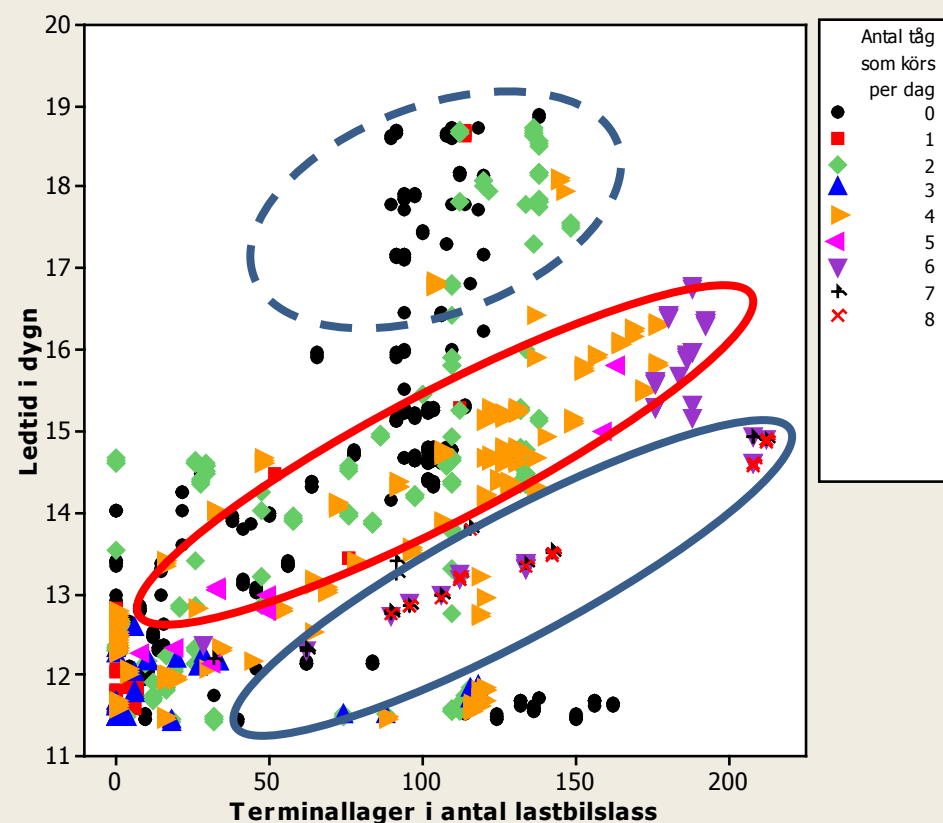
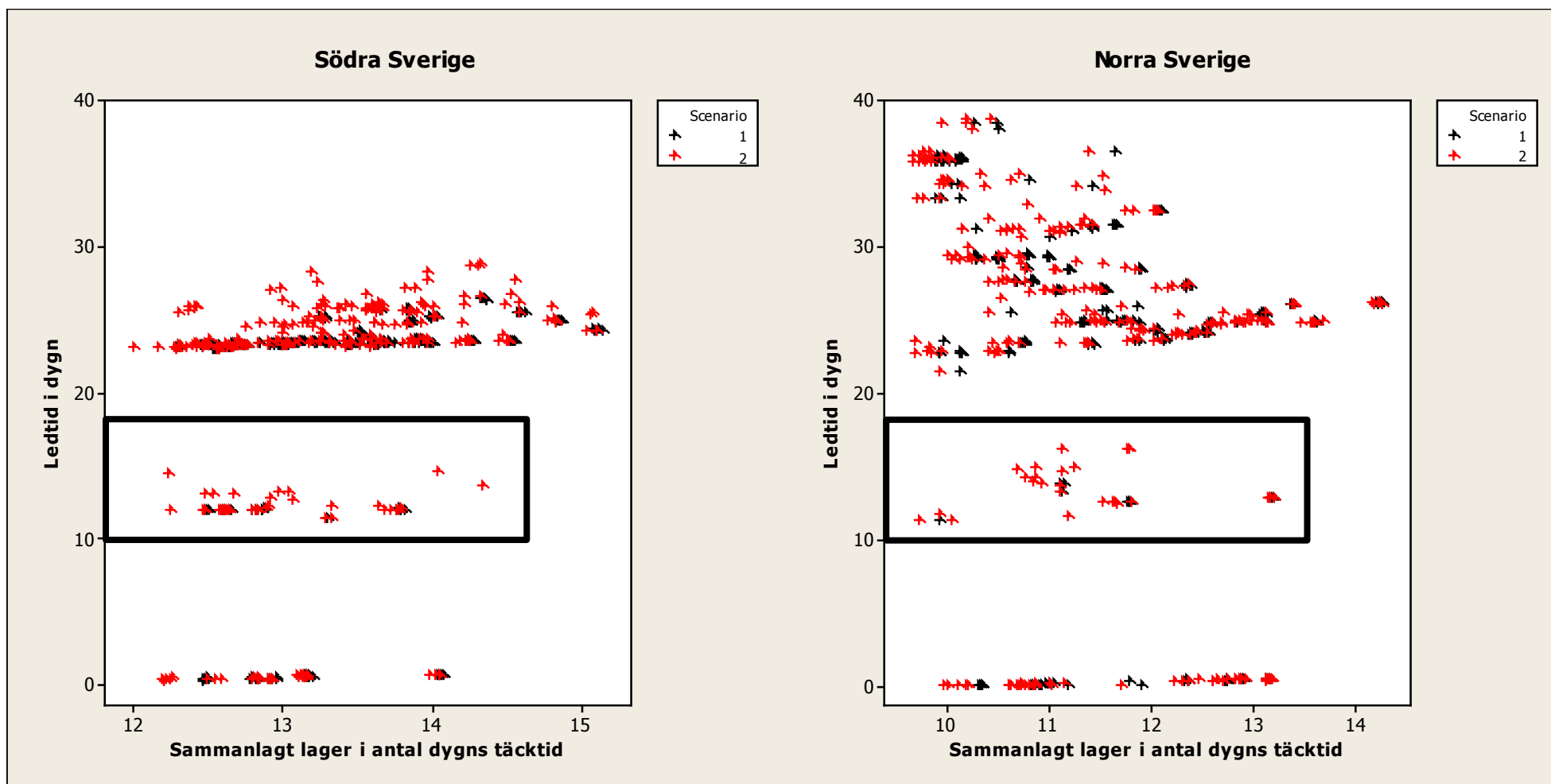


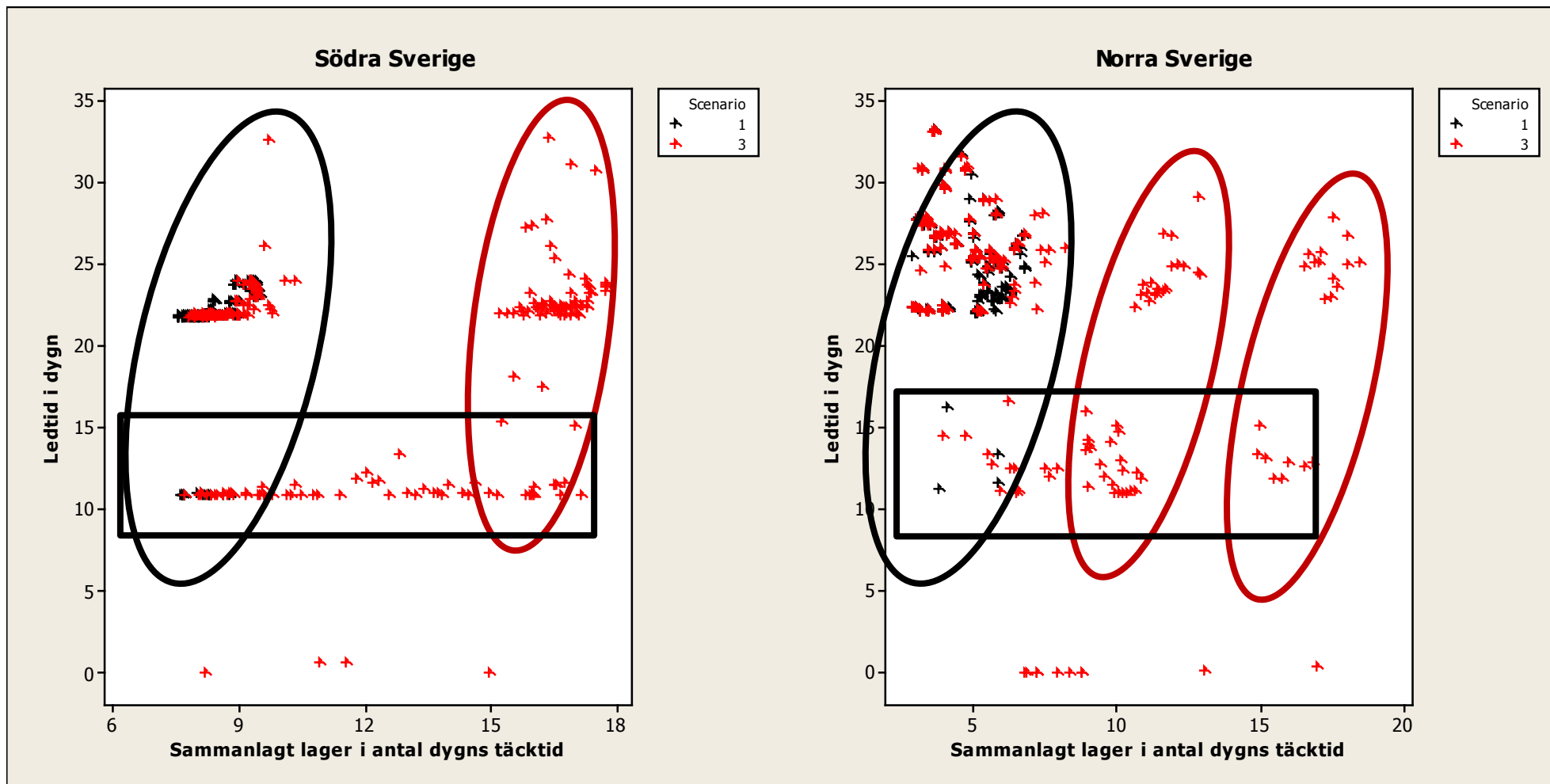
Figure 15. Samband mellan ledtid för tåg och terminallager för södra och norra Sverige i grundfallet. Värdena är kategoriserade efter antalet tåg som körs under den dagen. Cirkelarna visar olika grupper av observationer med avseende på antal tåg per dag och hur dessa grupperas i ledtid och lager. De blåa heldragna cirkelarna är den grupp av värden som har hög ankomstfrekvens och lägre ledtider, den röda heldragna cirkeln är den grupp av värden som har låg ankomstfrekvens och högre ledtid. Den streckade blå cirkeln är observationer som inträffar under en period med hög produktion till terminallagret. Linjerna visar på trender inom grupperna.

Figure 15. The correlation between lead times for railway transport and terminal stock for the south and north of Sweden. The values are classified by the number of trains that are run that day. The circles show groups of observations with different number of trains departing per day and how they group by stock and lead times. The blue circle contains the observations that have high arrival frequency and the red circle contains the observations that have a lower delivery frequency. The dashed blue circle contains observations during a period of high production. The lines show trends in the groups.



Figur 16. Ledtid mot sammanlagda lager under tjällossningsperioden för södra och norra Sverige. Ledtiden är uttryckt som ett viktat medelvärde mellan bil och tåg. Lagret är uttryckt som täcktid. Värdena är uppdelade efter scenario. Rektanglarna visar grupper av observationer med en högre andel biltransport.

Figure 16. The lead time versus total stock during the thawing period for the south and north of Sweden. The lead times are expressed as a weighted average between truck and railway transport. The total stocks are expressed as cover time. The values are grouped by scenario. The rectangles show groups of observations which differ from the others in distribution of rail- and truck transport.



Figur 17. Ledtid mot sammanlagda lager under haveriperioden för södra och norra Sverige. Ledtiden är uttryckt som ett viktat medelvärde mellan bil och tåg. Lagret är uttryckt som täcktid. Värdena är kategoriserade efter scenario. Rektanglarna visar grupper av observationer med en högre andel biltransport. De röda cirklarna visar grupper som uteslutande består av värden från scenario 3 (haveri) med högre lager vid samma ledtider.

Figure 17. The lead time versus total stock during the breakdown period for the south and north of Sweden. The lead times are expressed as a weighted average between truck and railway transport. The total stocks are expressed as cover time. The values are grouped by scenario. The rectangles show groups of observations which differ from the others in distribution of rail- and truck transport. The circles show groups that exclusively consist of values from scenario 3 (breakdown) with higher stocks at the same lead times.

4 Diskussion

4.1 Diskussion av resultatet

I detta avsnitt kommer först grundfallet att diskuteras, främst med avseende på dess validitet. Detta kommer följas av diskussion av scenarierna och simuleringarna med ökad tågandel för att sedan avslutas med diskussion av samband mellan nyckeltal.

4.1.1 Grundfallet

Leveransprecisionen (Figur 11) hade för grundfallet i båda systemen en större variation än de $\pm 5\%$ eller $\pm 10\%$ som eftersträvas i verkligheten (Klensmeden 2013). Det sammanlagda lagret varierar mellan cirka tre och 20 dagar (Figur 11) och detta överensstämmer väl med vad andra studier föreslagit (Uusitalo 2005; Bengtsson 2014). Ledtiderna (Figur 11) pendlade inom de färskhetsgränser som presenteras av Zilo (2013). Dessutom låg medianvärdena nära de värden som andra undersökningar föreslagit för liknande system (Zilo 2013).

För den stora variationen i leveransprecision fanns olika orsaker, för de över- respektive underleveranser som uppstår vid en höjning respektive sänkning av de planerade leveranserna orsakas sannolikt variationen av styrningslogiken. De kraftiga överleveranser som båda systemkonfigurationerna uppvisar i januari beror troligen på att systemet startar med tomma lager och därmed krävs det en period i början för att systemet ska vara funktionellt.

4.1.2 Jämförelse av scenariernas resultat

Scenarierna fick, som förväntat, olika effekter. Scenario 2 (tjällossning) hade en tydlig effekt på endast ledtid, vars variation ökade (jfr ledtid i Figur 12 och 13). Detta är rimligt då produktionstiden till väg- och terminallager förlängdes i detta scenario. Att scenariot inte hade någon effekt på varken lager eller leveransprecision beror troligen på att båda systemen under den period som störningen inträffade hade relativt höga lager, framförallt vid industri (jfr lager mellan dag 50 och 150 i Figur 9 och 10). Den begränsade effekten av scenario 2 (tjällossning) kan därmed delvis bero på att fördelningen av lager mellan olika noder inte var som planerat. En annan del av förklaringen är troligen att störningens omfattning skulle ökas eller att störningsperioden skulle förlängts för att effekterna skulle bli tydliga. Detta kommer diskuteras mer i avsnitt 4.2.2.

Resultaten från scenario 3 tydde på att systemet som representerar södra Sverige var bättre lämpat att parera störningar i efterfrågan (Figur 14). Detta berodde troligen på den gemensamma terminal som fanns i detta system. Denna medförde en snabbare omstyrning genom att inte ha lika lång transporttid till den alternativa industrin och dessutom möjliggjorde den att transporter kunde vara på väg till den ena industrin samtidigt som omstyrning påbörjades till den alternativa industrin.

4.1.3 Simuleringar med ökad tågandel

Gemensamt för samtliga simuleringar med ökad tågandel var att de minskade variationen i ledtid (jfr ledtid i figur 12 och 13). Detta skedde troligen då inflödet till industri blev jämnare med ökad tåganvändning. Förutom detta sänkte simuleringarna med ökad tågandel överleveranserna i scenario 3 (industrihaveri) betydligt från den nivå de har i grundsimuleringen (Figur 14). Detta berodde antagligen delvis på den ökade jämnhet som den ökade tåganvändningen skapar i inflödet till industri. En annan del av orsaken fanns troligen i

möjligheten att styra om till den industri som inte har havererat och därigenom tillfälligt minska överleveranser.

4.1.4 Nyckeltalens samband

De kartläggningar som gjordes av sambanden mellan lager och ledtid tydde på att det finns ett tydligt samband mellan ledtid för ett specifikt transportslag (bil respektive tåg) och det lager vilket det transporterar från (väg- respektive terminallager) (Figur 15 och 16). Sambanden för de volymer som transporterades med bil verkade vara olika mellan systemkonfigurationerna, där systemet som representerar norra Sverige hade ett betydligt brantare samband (Figur 15). Denna utveckling berodde troligtvis på att systemet som representerar norra Sverige hade en lägre industrikonsumtion och därför motsvarade samma volym en annan täcktid. Hade lagret i denna kartläggning formulerats som täcktid hade sambanden troligtvis varit mer lika varandra.

För de volymer som transporterades med tåg var sambanden mer lika mellan de två systemen (Figur 16). Detta berodde troligen på att tågandelen för systemet som representerar södra Sverige var betydligt lägre än vad den var i systemet som representerade norra Sverige. Därmed borde de volymer som transporterades med tåg varit mer lika än de som transporterades med bil. För de volymer som transporterades med tåg syntes också tendenser till två grupper av observationer med avseende på hur många tåg som går per dag. Dessa grupper bestod av en grupp med lägre antal tågavgångar per dag och högre ledtider och en grupp med högre antal tågavgångar per dag och lägre ledtider (jfr cirklarna i Figur 16). Sammantaget visade detta att ett lågt antal tågavgångar per dag gav lägre ledtider och det omvända gällde för ett högt antal tågavgångar.

Mellan sammanlagda lager och sammanlagda ledtider (Figur 17 och 18) var sambandet inte fyllt lika tydligt som för de enskilda transportslagen (jfr linjerna i Figur 18 med Figur 15 och 16). Detta berodde troligen på den uppdelning i grupper med skilda ledtider som fanns för de sammanlagda värdena. Denna gruppering berodde sannolikt på hur fördelningen mellan bil- och tågtransporter såg ut. I och med detta så borde den grupp som hade lägre ledtider till en högre del bestå av biltransporter, som har kortare ledtider. Det omvända borde gälla den grupp som har högre ledtider. Effekterna av scenario 2 (tjällossning) på dessa grupper bestod i att flertalet enskilda observationer försköts mot lägre lager och högre ledtider. Detta orsakades sannolikt av störningen i scenario 2, vilket vill säga, att produktionen till väg- och terminallager sänks genom att tiden förlängs under två veckor. Scenario 3 (industrihaveri) fick som effekt att ytterligare grupper skapades vilka skilde sig från övriga observationer med avseende på lagernivå (jfr cirklarna i Figur 18). Detta berodde på störningen som sker i scenario 3, att industriernas konsumtion stängdes ned. Även att det bildas fler grupper för det system som representerar norra Sverige orsakades av störningen i scenario 3, skillnaden mellan dem var att för den vänstra gruppen har endast en industri havererat medan för den högra gruppen har båda industrierna havererat. Att dessa grupper, som huvudsakligen bestod av observationer med relativt höga ledtider, inte är lika tydliga för södra Sverige beror troligen på den lägre tågandel som det systemet har. Detta genom att det inte kommit in tillräckligt många tåg under den period som endast en industri har havererat för att dessa ska synas tydligt. Däremot syntes ett flertal observationer i den lägre gruppen med lagernivåer motsvarande de som rådde då en industri hade havererat (Figur 18)

Simuleringarna med ökad tågandel gav dock, istället för en ökad uppdelning av ledtiderna, en minskad variation i ledtider. Detta antogs kunna bero på att den ökade tågandelen gör att antalet observationer med stor andel biltrafik, och därmed låga ledtider, sänktes. Kvar blev då

endast den grupp som har något högre ledtider vilket gav en ökad jämnhet. Detta förklarade både den minskade variationen och den ökning som uppstod i ledtider.

För att ytterligare utreda vilka samband som fanns mellan lager och ledtid för biltransporterna hade regressionsanalyser med justeringen av transportkapaciteten (hur stor andel som kör från B2) och volym i väglager kunnat utföras. På motsvarande sätt hade analyser kunnat genomföras av tågtransporterna. Det hade även varit möjligt att göra detta för att testa orsaken till de olika grupperingar av värden som syns i Figur 17 och 18. För dessa analyser fanns inte tillräcklig tid i denna studie men i framtida studier bör dessa vara intressanta att genomföra.

4.2 Utvärdering av material

I detta stycke kommer den data som användes för att formulera inställningar till simuleringsmodellen att diskuteras. Detta kommer innehålla diskussion av produktionsplanen med avseende på både vilka data som användes för att skapa den och metoden vilken det gjordes samt val av scenarier med avseende på störningstyp, tidpunkt och omfattning.

4.2.1 Produktionsplan

Då det data som fanns tillgängligt över produktionen inte bedömdes vara representativt av respondenterna formulerades en produktionsplan i samverkan med dem istället. Detta arbetssätt valdes då det var det mest tidseffektiva alternativet. Det bedömdes inte heller ge större felaktigheter då respondenterna har mångårig erfarenhet över hur produktionen normalt sett är fördelad över året.

4.2.2 Val av scenarier

I och med att valet av scenarier diskuterades med respondenterna är valet av själva störningarna väl förankrat. Däremot är det tänkbart att en kombination av scenario 2 (tjällossning) och scenario 3 (industrihaveri) hade fått annorlunda effekter på systemet och därmed medfört ytterligare resultat. Störningens tidpunkt har även den förankrats hos aktörer med stor insyn i hur de olika störningarna är uppbyggda. Dock hade det varit en fördel om störningarna haft en viss sannolikhet att återkomma efter att ha inträffat en gång. Detta hade varit en fördel då det, framförallt för tjällossning i södra Sverige, är vanligt med ett flertal separata störningar (Gustavsson 2015 pers. komm.). Störningarnas varaktighet har säkerställts på motsvarande sätt som tidpunkt och störningstyp. Något som hade ökat säkerheten i simuleringsresultaten hade varit om flera varianter av störningsperioder hade använts, lämpligen med olika sannolikheter. Detta hade troligtvis gett upphov till större effekter av scenarierna i några fall och därmed hade effekten av störningens omfattning kunnat kartläggas på ett tydligare sätt.

4.3 Utvärdering av metodval

I detta avsnittet kommer metodens fördelar och nackdelar att diskuteras med utgångspunkt i syftet. De delar som främst kommer diskuteras är den generella metodiken med kombinerad linjärprogrammering och OODES, transportplanens utformning och styrningslogiken. Slutligen kommer kombinationen av linjärprogrammering och OODES diskuteras.

4.3.1 Simuleringsmetodiken

Den kombination av linjärprogrammering och OODES som användes i detta arbete har endast använts i ett fåtal tidigare studier (Marques m.fl. 2012; Audy 2013). I dessa studier har den dock visat sig lämplig. Alternativa metoder hade varit att använda sannolikhetsfördelningar

över transporter (jfr Beaudoin m.fl. 2012). Detta hade dock krävt ett mycket större material över virkesflöde till industri och terminal över flera år, något som ej var tillgängligt.

Valet att använda ExtendSim för simuleringen gjordes då det är mer grafiskt än andra simuleringsprogram och det därmed blir enklare att sätta sig in i hur modellen bör konstrueras. Ett mer grafiskt program förenklar dessutom visualiseringen av problemet. Dessutom har det använts i flertalet liknande studier (Marques m.fl. 2012; Wahlström Bergstedt & Kollberg 2014; Eriksson m.fl. 2014; Audy 2013).

Genom att ExtendSim gjorde det enkelt att visualisera problemet kunde komplexa system på ett enklare sätt delas upp i hanterbara delar utan att de tappade sina egenskaper (Arnäs 2003). Till skillnad från ett verkligt system fanns också en större kontroll över de generella förutsättningarna och vilket gjorde det enklare att iaktta hur systemet reagerade sig under förändrade omständigheter (Anon 2007). Utöver detta gav OODES möjlighet för användaren att följa en enskild enhet genom hela systemet och därigenom mäta ledtider (Arnäs 2003; Anon 2007). Dessutom så kunde arbetssättet bli förutsäggande; genom analys av en modell av verkligheten kunde eventuella framtida problem i det verkliga systemet förhindras (Arnäs 2003). För att detta skulle bli möjligt krävdes att modellen inkluderade tillräcklig stor del av den variation som fanns i det verkliga systemet. Maximal variation uppnås genom simulering av långa tidsperioder då långa tidsperioder fångar de mönster som det simulerade systemet uppvisar (Kelton 1998). I virkesförsörjning bedömdes säsongsvariation vara det mönster som medför störst påverkan. På grund av detta simulerades 365 dagar, med start den första januari och slut den 31:a december.

Den metodik som användes för formulering av transportplanens målfunktion liknade den som används i verklig virkesförsörjning. Dessutom användes (genom produktionsplanen) indata som liknar det som näringen använder. Detta är en stor del av anledningen till att metodiken valdes samt att möjligheten inte fanns att få tillgång till empiriska data över transporter. Det som eftersträvades var att kopiera det arbetssätt som näringen använder när empiriska data inte var tillgängligt. Den exakta formulering av målfunktionen som gjordes baserades både på att respondenterna uttryckte minskad lagerförändring som önskvärt vilket är betydande för att åstadkomma högre nivåer av kundservice (jfr Tabell 3).

Transportplaneringen (Formel 1) har utförts på ett sällsynt sätt då det är vanligare att minimera kostnader än att minimera lagervariation. Endast Palander (1998) har använt en liknande metod som syftade till att skapa ett beslutsstöd för en hel försörjningskedja. Denna metod har dock varit ändamålsenlig med det enda undantag att den inte fullt ut lyckas minimera variationen i den första leveransperioden. Att i transportplaneringen eliminera problemet med variation i början av simuleringsperioden skulle kunnat åstadkommas genom att ett tillräckligt antal perioder läggs till innan perioden som kommer undersökas. Antalet extra perioder bör vara tillräckligt för att systemet ska kunna fyllas upp. Dessa extra perioder stryks sedan från analyserna (Asmoarp 2015 pers. komm.).

Trots att kombinationen av linjärprogrammering med Microsoft Excel och simulering med ExtendSim var en lämplig metod så har det uppstått en del problem mellan dem. Detta gällde framförallt då kommandon skulle skickas mellan dem. Dessa problem beror troligen på mjukvaran eller avsaknad av något tillägg till programmen. I fortsatta studier bör dock dessa problem kunna lösas och kommunikation mellan programmen användas på ett mer omfattande sätt.

4.4 Utvärdering av styrningslogik

Omallokeringen av transportresurser utfördes framförallt i förhållande till gränsvärden för lager och lagerutveckling (Tabell 7) för bil och i förhållande till flödet in till industri för tåg (Tabell 8 och 9). Att formuleringen baserades på dessa parametrar beror på att respondenterna framhöll dem som använda i praktiken. Förhoppningen i detta var att uppnå realism i styrningslogiken.

Styrning av produktion sker oftast genom antingen feedback eller feedforward. Feedbackstyrning definieras som styrning efter hur resultatet avviker från planen. Feedforwardstyrning definieras som styrning genom prognostisering av resultatet under produktionsprocessens utförande och anpassning av produktionen utifrån hur prognosen förhåller sig mot planen. Enligt dessa definitioner är den styrningslogik som använts i denna studie baserad på feedback. Enbart feedbackstyrning är tydligt begränsad i förmåga att styra system med långa ledtider. I sådana system används oftare en kombination av feedback- och feedforwardstyrning. Dock är styrning enligt feedforward mer komplex än styrning enligt feedback då det maximala antal parametrar som kan påverka utfallet behöver mätas för att skapa en tillförlitlig plan eller prognos (Fowler 1999). Till exempel skulle det vara nödvändigt att använda data över parametrar som temperatur, nederbörd, jordart med mera, för att kunna göra en kvalificerad prognos av när tjällossningen kommer inträffa, vilket är den simulerade störning som mest effektivt skulle kunna minimeras genom feedforwardstyrning.

En stor del av utmaningen i att reglera systemets responsökning (controller gain) finns vid feedbackstyrning. Responsökning definieras som kvoten mellan störningens och åtgärdens storlek. Denna skillnad ska vara relativt liten för att åstadkomma ett stabilt system, men hög för att åstadkomma hög känslighet. Så är fallet genom att stabilitet i ett system åstadkoms genom att endast en del av störningen åtgärdas åt gången och förändringarna i kontrollsystemet blir mindre och succesiva. För hög känslighet gäller det omvända, där ska en större andel av störningen åtgärdas i åtgärden. Genom detta uppstår det i alla system en avvägning mellan känslighet och stabilitet. Vid höga ledtider är det generellt sett lämpligt att ha en lägre responsökning (Fowler 1999).

Ledtiden var ofta längre än lagrets täcktid, i vissa fall upp till sex gånger så lång (Figur 18 och 19). Detta var troligen en bidragande faktor till sänkt stabilitet i systemet. En annan bidragande faktor till minskad stabilitet kan vara att systemen i samband med sänkningar respektive höjningar av de planerade leveranserna uppvisar under- respektive överleveranser. Denna typ av effekter, att responsen blev för kraftig och att systemet därmed överkompenserade, kan vara exempel på att responsökningen är större än vad som är lämpligt (Fowler 1999).

Responsökningens storlek kan också förklara den förbättring av leveransprecision som syntes mellan grundsimuleringarna och simuleringarna av ökad tågandel. Detta i och med den lägre nivå på responsökning som fanns i omallokeringsbesluten för tåg jämfört med bil. Även att omallokeringsbesluten för tåg innehåller fler steg än de för bil bidrog troligen till förbättringen. Detta kan innebära att en ändamålsenlig styrning med endast feedback skulle varit lättare att åstadkomma för ett system med högre tågandel.

Styrningslogiken skulle därmed kunna förbättras genom om en kombination av feedback- och feedforwardstyrning används. Detta kan åstadkommas genom en ökad användning av planering och prognostisering i simuleringsmodellen. Detta bör framförallt ske i samband med tjällossning och andra liknande störningar där den ungefärliga tidpunkten är känd. För

denna typ av styrningslogik är det centralt att kommunikationen mellan programmen som används för linjärprogrammering och simulering fungerar.

4.5 Jämförelse med andra studier

Det arbetssätt som använts i denna studie har inte använts i någon annan studie. Andra studier som utfört simulering av transporter har ofta baserat inställningar av parametrar i modellerna på data över utförandeprocessen i form av sannolikhetsfördelningar för transporter och produktion hellre än att använda data från den planering som utförs innan utförandet av transporter (Puodziunas & Fjeld 2008; Beaudoin, D m.fl. 2012; Wahlström Bergstedt & Kollberg 2014). Att inställningarna i den här studien baserades på planering berodde på att syftet var att simulera styrning av transporter och därmed fanns det ett intresse att belysa de skillnader som uppstår mellan det planerade utfallet och det faktiska utfallet. Av Marques m.fl. (2012) användes ett delvis likt arbetssätt men endast för en del av planeringen, närmare bestämt för att minimera kostnader av väntetider. Denna planering användes sedan för att skapa en ny form av kösystem där de transporter som hade högst prioritet betjänades först. Prioriteten beräknades bland annat på hur väl de olika transporterna höll planen och hur de hade gjort det tidigare. För att justera prioriteten pausades modellen och nya beräkningar av prioritet för de olika transporterna genomfördes. Detta innebär att den typ av planering som Marques m.fl. (2012) använde typ av planering mer liknar styrningslogik än skapande av inställningar. Även i rådande studie gjordes ett försök att skapa en sådan komponent i styrningslogiken vilken justerar planen efter utfallet, men tiden räckte inte till för att färdigställa komponenten. Detta vore ett nyttigt tillskott till en simuleringsmodell av detta slag.

4.6 Vidare forskning och slutsatser

Den fortsatta forskningen inom detta område borde kunna baseras på en liknande kombination av OODES och linjärprogrammering som använts i denna studie. Om detta görs borde dock denna metod kompletteras med åtgärder för att undkomma problemet med att systemet startar med tomma lager. Till exempel kan ett antal perioder läggas till i simuleringen för att strykas innan analyserna. Dessutom borde styrningen baseras på en kombination av feedback och feedforward och möjligtvis ha en lägre responsökning än i detta fall, genom att åtgärderna som tas vid olika störningar minskas i förhållande till störningens omfattning. En central del i den fortsatta forskningen bör vara att statistisk analys används för att testa resultaten men i övrigt torde metoden kunna vara i stort sett densamma som i denna studie.

Av de olika system som simulerats i denna studie verkar det som representerar södra Sverige ha en bättre förmåga att parera störningar i efterfrågan. I och med att den största skillnaden mellan de två systemen är att det som representerar södra Sverige har en större, gemensam terminal borde den största delen av denna skillnad bero på det. Exakt hur stor del som beror på detta och hur mycket som beror på skillnaderna i industrikonsumtion, mängd transportresurser och transporttider är ett område som behöver studeras mer ingående.

I och med att inga statistiska tester genomfördes kan inte hypoteserna förkastas eller godtas.

4.6.1 Slutsatser

Stora tågssystem brukar generellt sägas ge upphov till en större taktisk flexibilitet. I de simuleringar som genomförts i denna studie syns detta genom att en ökad tågandel gav en

ökad möjlighet att parera störningar i efterfrågan, genom en reducerad avvikelse i leveransprecision (Figur 14) likväl som en ökad jämnhet i ledtid under de perioder som innehöll störningar (jfr de understa raderna i Figur 12 och 13). Dessutom uppvisade systemet som representerade södra Sverige en lägre nivå av överleveranser i samband med störningar av efterfrågan (Figur 14). Ledtiderna verkade dessutom vara uppdelade i två grupper som troligtvis berodde på olika fördelningar av tåg- och biltrafik (Figur 17 och 18).

Slutsatserna av denna studie är därmed:

- Att åstadkomma realistisk respons i en simuleringsmodell av kombinerade transporter kräver en mer sofistikerad styrningslogik och eventuellt en mer sofistikerad planering än vad som användes i denna studie
- Ett järnvägssystem för leverans av massaved till två industrier med en stor central gemensam terminal verkar kunna parera haverier bättre än motsvarande system med två mindre industrispecifika terminaler
- En ökad tåganvändning vid försörjning av massaved ger en större möjlighet att behålla leveransprecisionen inom gränsvärdena och behålla låga ledtider vid industrihaveri och tjällossning.
- Om andelen av virket som transporteras på järnväg ökas kan detta ge upphov till ökade ledtider men i och med minskad variation i transporterad volym och förenklad styrning kan det ge upphov till en jämnare färskhet hos det transporterade virket.
- Genom den kombination av linjärprogrammering och objektorienterad händelsestyrd simulering som använts i denna studie ges möjligheter att analysera hur olika styrnings- och planeringsmetoder samt systemkonfiguration påverkar utfallet i virkesförsörjning, något som inte tidigare utförts. Modellen som skapats kan kompletteras med en möjlighet att göra om planeringen under simuleringsperioden vilket ger möjligheter att simulera en styrning och planering som använder rullande planeringshorisonter.
- De av studiens resultat som är direkt tillämpbara för industrin är att en ökad tåganvändning verkar ge upphov till jämnare ledtider samt en ökad förmåga att parera industrihaverier och tjällossningar.

Referenser

- Alayet, C. Lehoux, N. LeBel, L. & Bouchard, M. (2013). Planning and Control Model for a Forest Supply Chain. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Operations Research and Enterprise Systems. Barcelona; p. 5–13.
- Andersson, G. Flisberg, P. Lidén, B. & Rönnqvist, M. (2008). RuttOpt — a decision support system for routing of logging trucks. *Canadian Journal of Forest Research*, 38:1784–1796.
- Andersson, G. & Frisk, M. (2013). *Skogsbrukets transporter 2010*. Uppsala: Skogforsk.
- Andrén, M. & Fjeld, D. (2004). Information flow model for swedish pulp wood supply. *Silva Carelica*. 45:150–158.
- Anon. (2007). *Extendsim user guide*. San Jose: Imagine That inc.
- Arnäs, P-O. (2003). The uses of object-oriented methods in logistics and transportation research. In: Proceedings of NOFOMA 2003. Oulu.
- Audy, J-F. (2013). Optimizing the Forest Value Chain: Sustainability and Integration Challenges. In: VCO Network Workshop Report. Quebec city, Quebec: VCO; p. 15.
- Bäckström, P. & Åström, B. (2003). To Become a World Class Supplier. In: Proceedings of the 2nd Forest Engineering Conference. Vol. 536. Växjö: Skogforsk.
- Bark, P. (2005). *Effektiva tågssystem för vagnslast och systemtåg*. KTH Järnvägsgruppens.
- Beaudoin, D. LeBel, L. & Soussi, M-A. (2012). Discrete Event Simulation to Improve Log Yard Operations. *INFOR Information Systems Operational Research*. 50:175–185.
- Bengtsson, E. (2014). Behovet av lagringsyta vid flisning av energived vid ett befintligt skogsindustrikombinat. Opubl.
- Bergdahl, A. Örtendahl, A. & Fjeld, D. (2003). The economic potential for optimal destination of roundwood in North Sweden—Effects of planning Horizon and delivery precision. *International Journal of Forest Engineering*. 14:81–88.
- Carlsson, D. & Rönnqvist, M. (2005). Supply chain management in forestry—case studies at Södra Cell AB. *European Journal of Operational Research*. 163:589–616.
- Dogan, C-A. McClain, T-F. & Wicklund, S.A. (1997). Simulation modeling and analysis of a hardwood sawmill. *Simulation Practice and Theory*. 5:387–403.
- El Hachemi, N. Gendreau, M. & Rousseau, L-M. (2011). A hybrid constraint programming approach to the log-truck scheduling problem. *Annals of Operations Research*. 184:163–178.
- Eriksson, A. Eliasson, L. & Jirjis, R. (2014). Simulation-based evaluation of supply chains for stump fuel. *International Journal of Forest Engineering*. 25:23–36.
- Fjeld, D. & Dahlin, B. (2012). *Nordic logistics handbook - Forest operations in wood supply*. 12th–12th–05 ed. Umeå, Helsinki: Sveriges Lantbruksuniversitet, Helsinki University.

- Fohlin, P. & Silver, M. (1997). *Kvantitativa modeller för lokalisering av sågverk*. Luleå Tekniska Universitet, Institutionen för Industriell ekonomi och samhällvetenskap Licentiatuppsats. 42:43–59.
- Forsberg, M. (2002). Estimating the efficiency of a forest supply chain and the value of horizontal co-operation. In: Symposium on Models and Systems in Forestry. Chile.
- Forsberg, M. Frisk, M. & Rönnqvist, M. (2005). FlowOpt—a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. *International Journal of Forest Engineering*. 16:101–114.
- Forsberg, M. Lohmander, P. & Nordmark, U. (2000). *Optimum wood storage. A case study of different storage strategies at AssiDomain kraft pulpmill, Pitea*. Arbetsrapport 291, Institutionen för Skogsekonomi, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Fowler, A. (1999). Feedback and feedforward as systemic frameworks for operations control. *International Journal of Operations & Production Management*. 19:182–204.
- Haartveit, EY. Kozak, RA. & Maness, TC. (2004). Supply chain management mapping for the forest products industry: Three cases from western Canada. *Journal of Forest Products Business Research*. 1:31.
- Hägg, A. (1991). Lagring av timmer och massaved ur ekonomisk synvinkel. Rapport 225 - Institutionen för Virkeslára, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Hedlinger, C. Nilsson, B. & Fjeld, D. (2005). Service divergence in Swedish round wood transport. *International Journal of Forest Engineering*. 16:153–166.
- Hell, M. (2011). Geografisk prioritering av CTI-utrustad virkestransportkapacitet Arbetsrapport 329, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Hilmola, O-P. (2008). Railway Wagon Market Analysis and New Multi-Purpose Wagon Solution for Freight Transports-Finnish Manufacturing Perspective.
- Iannoni, AP. & Morabito, R. (2006). A discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 42:191–210.
- Kelton, WD. (1998). *Simulation with Arena*. Boston, Mass: WCB/McGraw-Hill.
- Korpinen, O-J. (2013). A Geographical-Origin–Destination Model for Calculating the Cost of Multimodal Forest-Fuel Transportation. *Journal of Geographic Information System*. 05:96–108.
- Löfroth, C. & Svenson G. (2010). *Två år med ETT: mindre CO2-utsläpp och färre virkesfordon på vägarna*. Skogforsk Resultat.:1–4.
- Lohmander, P. (1992). The optimal dynamic production and stock levels under the influence of stochastic demand and production cost functions: theory and application to the pulp industry enterprise. *Systems Analysis Modelling Simulation*. 10:103–132.
- Lukka, A. (1994). *Materials acquisition planning models*. Lapeenranta: Lapeenranta University of Technology.

- Lumsden, K. (1998). *Logistikens grunder: teknisk logistik*. Lund: Studentlitteratur.
- Marques, AF. Rönnqvist, M. D'amours, S. Weintraub, A. Goncalves, J. Borges, J. G. & Flisberg, P. (2012). *Solving the Raw Materials Reception Problem Using Revenue Management Principles: An Application to a Portuguese Pulp*. CIRRELT. 29:27.
- Mattsson, S-A. (2002). *Logistik i försörjningskedjor*. Lund: Studentlitteratur.
- Minitab statistical software. (2010). State Collage, PA: Minitab inc. Tillgänglig: www.minitab.com
- Nilsson, S. (2008). *Dimensionering av industrilager för biobränsle*. Arbetsrapport 224, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Palander, TS. (1998). Influence of Local Dynamic Conditions on Logistics Costs of Timber Procurement: Analyzed by Applying a Technique of Geographically Decentralized Decision Making. *Journal of Forest Engineering*. 9:61–75.
- Puodziunas, M. & Fjeld, D. (2008). Roundwood Handling at a Lithuanian Sawmill-Discrete-event Simulation of Sourcing and Delivery Scheduling. *BALTIC FORESTRY*. 14:163–175.
- Roth, M. (2010). *Ledtidens betydelse för privata skogsägares kundnöjdhet i samband med gallring*. Arbetsrapport 274, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Saranen, J. Hilmola, O-P. (2007). Evaluating the competitiveness of railways in timber transports with discrete-event simulation. *World Review of Intermodal Transportation Research*. 1:445–458.
- Skoog, E. (2000). *Leveransprecision och ledtid*. Arbetsrapport 72, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Sundberg, U. & Silversides, CR. (1988). *Operational efficiency in forestry*. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Uusitalo, J. (2005). *Introduction to wood supply management*. Wood supply chain management course, Hytiälä
- Wahlström Bergstedt, S. & Kollberg, E. (2014). *Simulering av kötider för en alternativ trucklösning vid Holmens kombinat i Iggesund*. Kandidatarbete i skogsvetenskap 24. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet
- Weintraub, A. Epstein, R. Morales, R. Seron, J. Traverso, P. (1996). A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. *Interfaces*. 26:1–12.
- Widinghoff, J. (2014). *Ny logistiklösning i samband med nedläggningen av Vilhelminas sågverk*. Arbetsrapport 417, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
- Zilo, T. (2013). *Reducering av transportledtid för lövtimmer och brännved genom samtransport med andra sortiment*. Arbetsrapport 401, Institutionen för skoglig resurshushållning. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.

Personlig kommunikation

Asmoarp, Victor. 2015 Forskare, Skogforsk, 2015-03-27.

Bengtsson, Emil. 2014 Transportledare, Södra skog, 2014-12-20.

Frick, Thomas 2014. Råvarukoordinator, Södra skog, 2014-10-28.

Gustavsson, Kjell 2015. Skogsskötselchef, MO Syd, Sveaskog, 2015-01-14.

Klensmeden, Ulf 2013. Virkeschef, StoraEnso,

Ljunggren, Ingemar 2014. Industriförsörjningsansvarig, SCA Skog, 2014-12-20.

Pettersson, Olle 2014. VD, Trätåg AB., 2014-11-26.

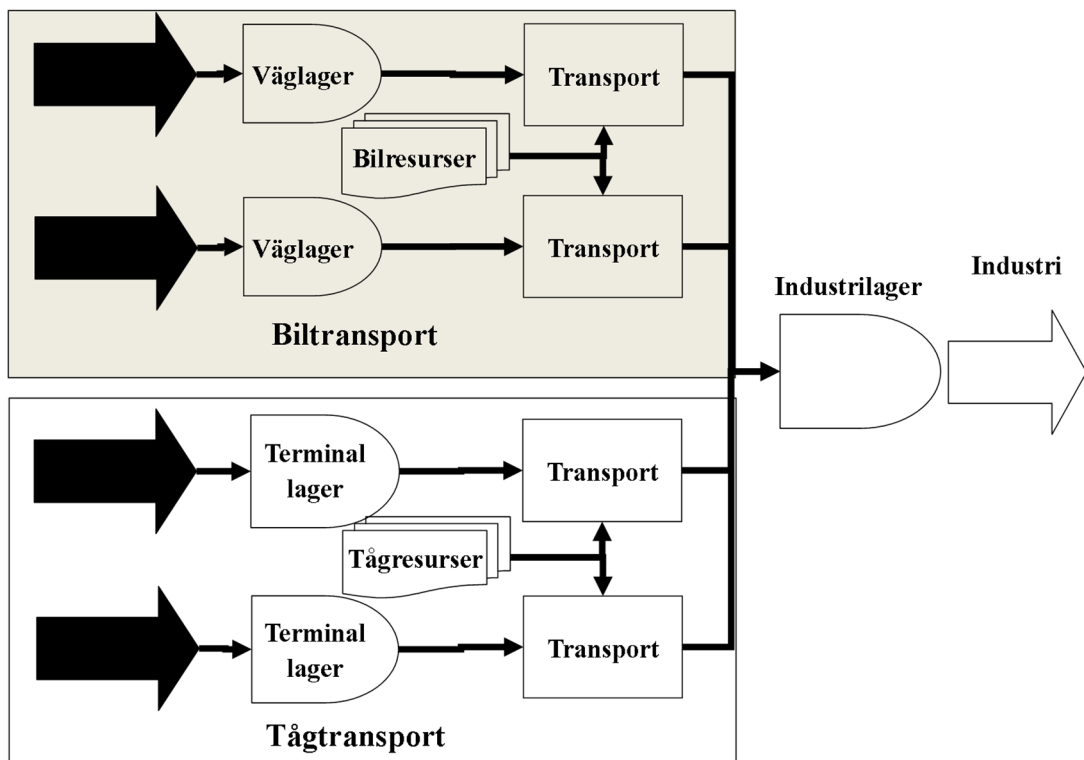
Sakari, Henrik 2014. Kundförsörjningschef, SCA skog, 2014-10-27.

Yring, Daniel 2015. Vägansvarig, Medelpads skogsförvaltning SCA skog, 2015-02-16.

Bilagor

Bilaga 1 – Schematisk bild av simuleringsmodellen

I bilden nedan visas transporterna till en av industrierna, den verkliga modellen innehåller två speglade delar och vägar för omstyrning mellan industrierna.



Bilaga 2 – Schematisk bild av modellen för skapande av inställningar till simuleringsmodellen

Schematisk bild över hur inställningar till simuleringsmodellen har skapats. I denna skiss har produktionen av virke skett på de rader som är benämnda harvesting, lagring har skett i de rader som är benämnda roadside-, terminal- och mill stock och transport har skett i de rader benämnda transport och transport vol. Virke har rört sig från de olika noderna (B1, B2, T1, T2) till industrin där det har konsumerats.

Truck transport	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
<u>B1</u>												
-harvesting												
-Roadside stock												
- Transport												
<u>B2</u>												
-harvesting												
-Roadside stock												
- Transport												
Rail transport												
<u>T1</u>												
-Harvesting												
-Terminal stock												
- Transport %												
- Transport vol												
- Transport change												
<u>T2</u>												
-Harvesting												
-Terminal stock												
- Transport %												
- Transport vol												
- Transport change												
<u>Mill</u>												
- Deliveries												
- Mill stock												
- Consumption												
- Stock change												